

ISSN 0910-7851

伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1997^{October}
Vol. 36 No. 143

〈特集：宇宙環境における伝熱〉

ISSN 0918-9963

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

Vol. 5

No. 4

社団法人 日 本 伝 熱 学 会
The Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱学会第36期（平成9年度）役員

会 長 副 会 長 理 事 (編集出版) 中国四国 (企 画) 北海道 北陸信越 (総 務) 東 海 監 評 員	長 (慶 大) 副 長 (編 集 出 版) (企 画) (総 務) 森 岡 齋 (徳 島 大) 小 澤 由 行 (高 砂 熱 学) 早 坂 洋 史 (北 大) 竹 内 止 紀 (福 井 大) 松 尾 篤 二 (三 菱 重 工) 辻 俊 博 (名 工 大) 鳥 居 薫 (横 浜 国 大) 山 本 春 樹 (旭 川 高 専) 中 部 主 敬 (京 大) 浜 辺 謙 二 (川 崎 重 工) 加 藤 征 三 (三 重 大) 中 村 泰 久 (東 邦 ガ ス) 中 山 顕 (静 岡 大) 松 田 仁 樹 (名 大) 稲 葉 英 男 (岡 山 大) 佐 藤 春 樹 (慶 大) 菊 地 義 弘 (広 島 大) 田 中 収 (三 浦 研 究 所) 斎 藤 明 宏 (新 潟 工 科 大) 姫 野 修 廣 (信 州 大) 稲 村 隆 夫 (弘 前 大) 青 木 秀 之 (東 北 大) 松 田 理 (石 川 高 専) 時 田 雄 次 (大 分 大) 中 島 忠 克 (日 立) 富 山 明 男 (神 戸 大) 西 野 耕 一 (横 浜 国 大) 井 上 剛 良 (東 工 大) 田 島 守 (神 奈 川 大) 一 宮 浩 市 (山 梨 大) 飛 原 英 治 (東 大) 水 上 紘 一 (愛 媛 大) 前 川 透 (東 洋 大) 宮 内 敏 雄 (東 工 大) 佐々木 章 (秋 田 高 専) 吉 出 英 生 (東 工 大) 武 内 洋 (工 技 院 北 工 研)	長 島 昭 (慶 大) 藤 田 恭 伸 (九 大) 塩 冶 震 太 郎 (石 播 重 工) 飯 田 嘉 宏 (横 浜 国 大) 部 会 長 熊 田 雅 弥 (岐 早 大) 九 州 井 村 英 昭 (熊 本 大) 五 十 嵐 喜 良 (東 北 電 力) 部 会 長 四 尾 茂 文 (東 大) 伝 熱 シ ン ポ ジ ウ ム 準 備 委 員 長 藤 田 秀 臣 (名 大) 東 北 太 田 照 和 (東 北 大) 関 西 中 島 健 (神 戸 大) 関 東 山 田 幸 生 (工 技 院 機 械 研) 満 淵 邦 彦 (東 大) 大 隅 正 人 (三 洋 電 機) 堀 政 義 (石 播 重 工) 宗 像 鉄 雄 (工 技 院 機 械 研) 勝 田 正 文 (早 大) 奥 山 邦 人 (横 浜 国 大) 本 田 知 宏 (福 岡 大) 鶴 田 隆 治 (九 工 大) 浅 古 豊 (都 立 大) 松 島 均 (日 立) 鳥 居 修 一 (鹿 児 島 大) 岸 浪 紘 機 (室 蘭 工 大) 矢 部 彰 (工 技 院 機 械 研) 大 河 誠 司 (東 工 大) 山 脇 栄 道 (石 播 重 工) 中 山 明 人 (ト ヨ タ 自 工) 長 坂 雄 次 (慶 大) 原 村 嘉 彦 (神 奈 川 大) 高 出 保 之 (九 大) 小 宮 山 正 治 (阪 大) 久 角 喜 徳 (大 阪 ガ ス) 福 山 佳 孝 (東 芝) 松 本 浩 二 (宮 崎 大) 中 込 秀 樹 (東 芝) 菱 田 誠 (千 葉 大) 神 永 文 人 (茨 城 大) 塩 津 正 博 (京 大) 佐 藤 勲 (東 工 大) 村 上 周 三 (東 大) 廣 瀬 宏 一 (岩 手 大) 岡 田 昌 志 (青 山 学 院 大) 長 崎 孝 夫 (東 工 大)
--	---	--

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進 (東 洋 大)

伝熱研究 目次

〈随想〉

- 改革の時代 瀧本昭 (金沢大学工学部)1
 専門用語「伝熱」と「熱伝達」について 藤江邦男 (新明和工業 (株))3

〈特集：宇宙環境における伝熱〉

- 特集「宇宙環境における伝熱」にあたって
 第36期編集委員会 小宮山正治 (大阪大学)8
 臨界点近傍での伝熱現象 東久雄 (航空宇宙技術研究所)9
 微小重力下の気液二相流 藤井照重 (神戸大学工学部機械工学科)16
 表面張力対流の挙動 今石宣之 (九州大学)23
 宇宙エネルギーシステムにおける液滴冷却器 羽賀一男 ((財) 原子力発電技術機構)31
 月面ミッションのエネルギー供給と熱制御 板垣春昭 (宇宙開発事業団, 技術研究本部)37

〈研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究〉

- 「研究ノートから：一伝熱問題に関する未成功研究」の編集にあたって
 第36期編集委員会 小澤由行 (高砂熱学工業 (株), 総合研究所)45
 サーモプレッサーの夢と失敗 一色尚次 (日本大学)49
 単一液粒の蒸発実験 小林清志 (豊田工業大学)52
 一氷状凝縮の温度履歴 武山斌郎 (石巻専修大学)54
 「研究を評価すること」 平田賢 (芝浦工業大学システム工学部)56
 家庭冷房機用熱交換器の原価低減 藤江邦男 (新明和工業 (株))58
 「未成功」は「成功」の素 棚澤一郎 (東京農工大学)60
 「伝熱研究における失敗談」 --- 原理は易し, 結果を得るは難し --- 井上晃 (東京工業大学)64

〈世界のホットユース〉

- 溶融状態における樹脂材料の特性試験 ~ミネソタ大学より~
 齊藤卓志 (ミネソタ大学化学工学・物質科学科)66

〈フロンティアフォーラム〉

- The Frontiers および The Frontiers Group 形成について
 第36期企画部会長 西尾茂文 (東京大学生産技術研究所)69

〈賛助会員紹介〉

- 三菱重工業 (株) 高砂研究所 藤本哲郎 (三菱重工業 (株) 高砂研究所)71

〈行事カレンダー〉

-75

〈支部活動報告〉

北陸信越支部活動報告	76
------------	----

〈お知らせ〉

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞公募のお知らせ	77
第35回日本伝熱シンポジウム研究発表募集	79
“The Frontiers Forum 準備セッション” 企画募集 (第35回日本伝熱シンポジウムにおいて開催)	82
第6回微粒化シンポジウム	82
講習会 (No.97-67) 混相流技術の実用化ー基礎・計測から数値解析までー	83
第5回 ASME-JSME 熱工学合同会議論文募集	84
日本伝熱学会北海道支部 特別講演会のお知らせ	85
日本伝熱学会北海道支部・断熱材研究会合同講演会	85
「分子伝熱検討会」発足のご案内	86
東京都立科学技術大学教官公募	87
「伝熱研究」会告の書き方	87
「伝熱研究」原稿の書き方	88
事務局からの連絡	89
日本伝熱学会、入会申込み、変更届用紙	91

インターネット情報サービス

- <http://htsj.mes.titech.ac.jp/htsj.html>
最新の会告・行事の予定等を提供
- htsj-info@mes.titech.ac.jp
最新の情報を電子メールで受け取りたい方のための電子メールアドレスの登録受付
- htsj@mes.titech.ac.jp
事務局への連絡の電子メールによる受付

Journal of The Heat Transfer Society of Japan
Vol.36, No.143, October, 1997

CONTENTS

<Essay>

The Period of Reform

Akira Takimoto (Kanazawa University) 1

On the Technical Terms 'Dennetsu' and 'Heat Transfer'

Kunio Fujie (ShinMaywa Industry, Ltd.) 3

<Special Issue: Heat Transfer in Space Environment>

Preface to Special Issue: Heat Transfer in Space Environment

Masaharu Komiyama (Osaka University) 8

Heat Propagation Phenomena in a Near-Critical Fluid

Hisao Azuma (National Aerospace Laboratory) 9

Gas-Liquid Two-Phase Flow under Microgravity

Terushige Fujii (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University)
..... 16

Some Aspects of Marangoni Convection

Nobuyuki Imaishi (Kyushu University) 23

Liquid Droplet Radiators in Space Energy System

Kazuo Haga (Nuclear Power Engineering Corporation) 31

Power Supply and Thermal Control for Lunar Mission

Haruaki Itagaki (Advanced Mission Research Center, NASDA) 37

<From Research Notes: Still Unsucceeded Research on Heat Transfer Subjects>

Preface to "From Research Notes": Still Unsucceeded Research on Heat Transfer Subjects

Yoshiyuki Kozawa (R & D Center, Takasago Thermal Engineering Co. Ltd.) 45

Dream and Failure of Thermopressor

Naotsugu Issiki (Nihon University) 49

Experiment on Evaporation of a Single Droplet

Kiyosi Kobayasi (Toyota Technical Institute) 52

Thermal Hysteresis on the Gracial Condensation

Toshiro Takeyama (Ishinomaki Senshu University) 54

Evaluation of Research Projects

Masaru Hirata (Dept. of Systems Engineering, Shibaura Institute of Technology) 56

Cost Reduction of the Heat Exchanger in Domestic Room-cooler Kunio Fujie (ShinMaywa Industry Co., Ltd.)	58
Failure is a step to success! Ichiro Tanasawa (Tokyo University of Agriculture and Technology)	60
Principle is simple, but getting result is not easy! Akira Inoue (Tokyo Institute of Technology)	64
<World Hot Youth>	
Property Measurement of Molten Polymer -Report from University of Minnes- Takushi Saito (University of Minnesota)	66
<Frontier Forum>	
Formation of “The Frontiers” and “The Frontiers Group” Shigefumi Nishio (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)	69
<Profile of Industrial Member>	
Introduction of Takasago R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Tetsuro FUJIMOTO (Takasago R & D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)	71
<Calendar>	75
<Reports on the Activities of Chapters>	76
<Announcements>	77

改革の時代

The Period of Reform

瀧本 昭 (金沢大学工学部)

Akira TAKIMOTO (Kanazawa University)

まえがき

1992年、伝熱研究会が伝熱学会へ移行し、さらに、本学会誌「伝熱研究」も1996年1月号から編集方針・内容が一新され、毎号、<随想>欄がその目次に加わった。それに私が執筆するよう伝熱学会編集委員長の岐阜大学の熊田先生から突然の依頼を受けた。これまで執筆された大先生のように伝熱研究の回顧あるいは将来の展望をわたしのごとく若輩者が書くには、まだ15年も(定年退官まで)早いのでと何度も固辞したが、故土方先生の方針で年輩者と若手が交互に執筆することになっているとの委員長の説得に圧されて、この際、何が書けるかわからないがこの頃思っていることを書いて、その責を全うすることとした。

行革と大学改革

昨今、「行革」が新聞マスコミを賑わしている。すでにご存知の通り、行政改革会議(会長:橋本竜太郎首相)により現行の22省庁を1府12省庁にする再編する改革案が発表され、実現に向けて山場を迎えようとしている。文部省関係でも、行政効率化に向けて独立行政法人(日本型エージェンシー)の導入計画として、全国98国立大学の職員12万5千人、(非現業の国家公務員の4分の1に相当する)を文部省から分離・法人化、すなわち、国立大学の独立機関化、民営化、地方自治体への移管が発表されたが、文部省の「教育研究水準の低下を招く」、国立大学協会会長の井村京大学長の「学問の継続性に大きなひびを生じさせ、学問研究を著しく弱体化させる危険性がある」との反対により今回は無事難を逃れた。しかし、今後の展開としては、郵政三事業の民営化とともに国立大学でも定員削減に留まらず大改革されることも必須のこととなる。

大学の現状に目を向けると、平成3年7月の「大学設置基準」の大綱化を契機として課程区分の撤

廃、教養部の改組(廃止)、教育学部の教員養成課程の統合改組、シラバスの作成、点検評価など「大学改革」が進められた。さらに、追い打ちをかけるように、文部省は1997年5月に行革の一環として平成12年度までに、少子化の時代を迎え教員養成課程の定員を現在の1万4,515人から5千人削減すること、および臨時増募の学生定員の返還を発表した。少子化の時代といえ、わたしは戦後のベビーブームのいわゆる段階の世代であり、学生時代には教室に隙間のないくらいに机を並べ、特別教室も全て教室として利用する学校生活を過ごし、社会に出ても常に同期生が最も多く、これから先も、高齢化時代の予備軍として、医療保険法、年金制度の改革(支払い延長)などなど、ますます改革中に置かれていくことであろう。

人の数については、同様に医学系でも問題になっている。1994年のデータによると、我が国の医師の数が23万人とこの30年間で倍増し、人口10万人あたり184人と、欧米での抑制の目安と言われていた10万人に対して200人という基準を超えており、このままでは、2015年には、2万3千人の医師が過剰となることが報告されている。医師免許をもったスポーツ選手や、仕事が無くてタクシードライバーしているなんてのは欧米ではもう当たり前で、そのうち日本でもそうなるのであろうか。医学系の学生定員の削減、医師免許試験を難易度アップ、医師の定年制の導入など、その改革も急務であろう。

わたしの最近の仕事も「大学改革」が中心で、会議がやたら多くなっている。教養部改革、カリキュラム改革、それに伴う全学出動体制のもとでの教養的科目の授業担当、そして、大学総合移転(金沢大学)、大学の重点化など、本来の研究教育とは程遠い行政的な仕事にかなりの時間を費やしているが、これまでお世話になり、自分を育ててくれた大学へのご恩返しと思い、若手の一教官として大学100年の計の立案・実施のために微力ながら日々努力してい

る昨今である。ただ、大学院の拡充により院生の数も卒研究生より多くなり、定員削減により教職員の数が年々減少し、ますます雑用が増えるばかりで、大学教職員の誰しもがオーバーロードとなってきた。こんな風に改革して本当に、日本の科学技術の進展のためになっているのかいつも自問自答ばかりである。そうはいつでも、最後は自分自身で時間の有効利用と頭の切り替えにより、今が乗り切らねばならない正念場と思い、精一杯やっている毎日である。

学会の改革

わたしにとって、日本伝熱学会は第9回伝熱シンポジウム（昭和47年広島）からお世話になって早25年、日本機械学会とともにメイン学会として位置づけ、毎年のシンポジウムへの参加講演が全てに優先する業務である。第1回シンポジウムが1964年京都会館で開催され、その29件の講演論文を「伝熱研究」誌の3巻10号特集号に掲載しており、現在でも会員にシンポジウム講演論文集を無料で配布している歴史の発端を感じた。

それにしても、学会の話になるといつも、「いくつの学会に所属している？」ということが話題になる。大体は、3つ以下というのは殆どなくて、3つ以上の学協会に所属しているという答えが返ってくる。今の日本には、学協会は一体幾つあるのだろうか、「全国学術研究団体総覧」(1)によると、(1)学術研究の向上発達を図ることを目的としていること。(2)100名以上の科学者である個人会員によって構成されていること。(3)会則等に名称、目的、事務局、構成員の資格及び代表者の定めがあること。(4)目的達成のために、引き続き3年以上活動しており、年1回以上の集会、刊行物の発行を行っていること。(5)構成員が特定の地域又は団体に属するものに限られていないこと。役員が過半数が科学者であること。の5つの基準条件を具備する学術研究団体、および(1)学術研究の向上発達を図ることを目的としていること。(2)個人会員である構成員の数が原則として100名以上であること。(3)会則等があり、機関誌の発行、集会を行っていること。の3つの条件を満たす広報協力学術団体に関して、各分野ごとにそれぞれ、I.文学、哲学、教育学・心理学・社会学、史学の分野が427団体、II.法律学、政治学が61、III.

経済学、商学・経営学が92、IV.理学が140、V.農学が138、VI.医学、歯学、薬学が454、VII.工学が191で合計1,503団体となっている。その規模としては、工学系では、日本機械学会がトップで正会員37,805人、次いで電子情報通信学会(36,611)、日本建築学会(35,475)、土木学会(32,028)、自動車技術会(29,195)、情報処理学会(28,932)、電気学会(24,646)、応用物理学会(20,746)、空気調和・衛生工学会(19,595)、火力原子力発電技術協会(13,546)、地盤工学会(12,983)、高分子学会(10,927)などがマンモス学会で以下正会員1,233人の日本伝熱学会の規模を超える学会が目白押しであり、数百人の学会も含めて年々増加の一途であるということである。勿論、それぞれに目的・必要性、また特徴があつてのことと言えなが、単に所属するだけでも高額な会費が必要となるだけではなく、役員幹事あるいは委員を担当することになると、これまたボランティアで「学会の活性化や会員増強」のためと仕事が増えることになる。この際、学会も行政改革を見習って、少し整理統合することが必要ではないのだろうか……

いつの世でも改革があつて進歩があることと思うが、それにしても「効用価値低減の法則」で、満ち足りれば足りるほど価値は低減する感である。

おわりに

全く、思いつきのみで、「伝熱研究」誌のページに汚点を残した。研究のことも少しはと思ったが、これまでの「伝熱研究」誌に掲載された伝熱の先達の大先生方々の随想、そして伝熱学会発足3周年記念号(1996)の「小特集：伝熱工学・熱工学の将来」にあるとおりである。改革の時代、大学の生き残りのために、また研究費の獲得のためにも、流行とは言わないが、時代の要求に沿う研究が必要なのではないかとしみじみ思う最近である。科学技術基本計画にあるように、また、科学技術庁の技術予測調査の報告にあるように、伝熱とはいえ社会に役立つ研究により一層励む所存であることには間違いないところであることを記して結びとしたい。

(1)全国学術研究団体総覧、日本学術協力財団編、1996。

専門用語「伝熱」と「熱伝達」について

On the Technical Terms 'Dennetsu' and 'Heat Transfer'

藤江 邦男 (新明和工業 (株))

Kunio FUJIE (ShinMaywa Industry, Ltd.)

1. まえがき

当学会の名称に用いられている「伝熱」について、昨年の学会誌「伝熱研究」(4巻3号)に越後前会長が就任のご挨拶の末尾で、「伝熱とか熱伝達という専門用語は、誰が初めて用いたのか興味もありますが、われわれは Heat Transfer に拘わるより・・・(中略)・・・社会に定着するような、日本語名を考案することが必要ではないかと思えます。」と述べておられる。また、本年1月の学会誌に小竹元会長が「伝熱という名の学会」の記事を書かれており、「伝熱」という用語について私自身も関心を持ったので、その起源について調査し一応の見通しを得たので、越後先生の薦めもあり、敢えて発表して会員皆さんからの忌憚のないご意見が、寄せられることを願っています。

他方、世界的に見ても「伝熱」に関する研究の歴史は19世紀後半に始まった。明治初期以降の学問であることを念頭において読んで頂きたい。

2. 調査と考察

漢字の語源を調べる場合、まず中国の古典に記述されているか否かを知ることから、始めるのが常套手段であるが、「伝熱」について古典を調べた範囲ではこの漢字はなく、「伝」を頭にした熟語で、しかも熱と関連する字が使われている熟語として、「伝火」が記録されている。「伝火」は和文として読む際には返字であるため返点が付くので、「火を伝える」と読み「火を燃やす」意味である。

「熱伝達」については「伝達」の熟語が中国古典しゆんしよきふん“春渚紀聞”に「伝達其言」の記述があったが、残念ながら「熱伝達」の熟語は見当たらなかった。

次に科学技術の先進国である欧米では、第2次大戦までは、heat transmission と heat transfer が伝熱の意義で用いられていた。しかし、大戦後は欧米で出版された「伝熱」に関する本で、「heat transmis-

sion」が題名として使われているのは、1954年に発刊された W.H. McAdams 著が有名であるが、多くの本は heat transfer を用いていることは皆さんもご承知の通りです。最近では heat transfer は conduction heat transfer, convection heat transfer, radiation heat transfer のようにも使われており、熱の移動現象の総称として用いられている。しかし、日本では特に機械学会並びに伝熱学会で発刊している伝熱工学書では、固体面と流体の間の熱移動過程を対流熱伝達と呼び、他の伝熱現象を熱伝導、熱放射又は放射伝熱などと呼んでいる。その他の学協会では表1に示すように、伝熱と熱伝達は同意義で、伝熱現象(伝導、対流、放射)の総称として使われる場合が多数派である。

和語の伝熱、熱伝達は外国語の訳語と考え、特に幕末から明治初め頃の啓蒙書を調べることから始めるのが手順と考えた。まず幕末オランダに留学した啓蒙思想家西周の著書で有名な「百学連環」(1870年稿)を調査した。彼は技術者ではないが、多才の士でありフィロソフィーを哲学と訳したことで有名である。しかし、伝熱、熱伝達の熟語はなかったが、熱工学の用語として潜熱について「[Latent heat]を潜温と訳しており、さらにその意義を「萬有悉く熱を含まざるはなきものにて、冷水と雖も必ず熱を含む、之を潜温とす。潜温は1757年英の Dr. Black (化学者)なる人の發明せるところなり。水は空気たるものなき時は32度にして沸騰するものとす。」と記載している。その外、Thermology (熱論)、Conduction of heat (熱の引受)、Vaporization (蒸発)、Combustion (焼滅)、Expansion (膨張)など用語英和があった。

同時代のもう一人の啓蒙思想家、教育者である福沢諭吉著「訓蒙窮理図解」(明治元年刊)巻の一に、あつきのもの つめたきもの「熱物と冷物と相触れば、熱物の熱を冷物に伝へ、あつき互いに平均して一様の温度となるものなり。されども品柄に由て熱を伝へ受るに速き物と遅き物とあり。」の記事があり、熟語「伝熱」は見当たらない。

表1 科学技術専門用語辞典一覧表

書名 (発行所) 発刊日	和語(備考)	英語
物理学術語和英仏独対訳字書 (博聞本社) 明治21年6月	伝導 伝達 輻射 対流	conduction transmission radiation convection
工学字彙(完)第2版(工学協会) 明治21年10月印刷 初版; 明治19年8月	伝導 伝達 発射 潜熱 顕熱 比熱 伝熱面	conduciton transmission radiation latent heat sensible heat specific heat heating surface
工学字彙(完)第4版(工学協会) 明治35年12月17日	環流(熱或ハ電気ノ)	convection
機械工学術語集(第2輯) (機械学会) 明治43年10月20日	輻射 伝導。伝り。 運び流れ	radiation conduction convection
工学共通用語集(日本工学会編) 昭和14年9月2日	伝熱面	heating surface
学術用語文部省編集 (社)電気学会) 昭和42年9月20日	熱伝導 熱対流 熱放射	heat conduction heat convection heat radiation
科学史技術史事典 (弘大堂) 昭和58年3月10日	熱伝達	heat transfer
物理学辞典 (培風館) 昭和59年9月30日	熱伝達または伝熱	heat transfer
科学大辞典 (丸善) 昭和60年3月5日	伝熱(熱の移動現象を伝熱とよび、特に工学上流体と固体表面との間の熱移動は熱伝達とよばれる)	heat transfer
マグローヒル科学技術用語大辞典 (日刊工業新聞) 昭和60年3月25日	伝熱 熱伝達	heat transfer heat transmission
電気工学ハンドブック (電気学会) 昭和63年2月	熱伝達(物体表面から流体への伝熱をいう。伝熱現象には熱伝導、熱放射、対流の3種あり)	heat transfer

電子情報通信ハンドブック (オーム社) 1988年3月	伝熱 (伝熱の様式には、伝導、対流、輻射がある)	heat transfer
カーク・オスマー化学大事典 (丸善) 昭和63年9月	伝熱	heat transfer
物理学大辞典 (丸善) 平成元年6月	熱輸送	heat transfer
J I S工業用語大辞典 (財)日本規格協会) 1991年11月20日	熱伝達 (熱の移動現象の総称。伝熱または熱移動ともいう) 熱伝導 対流熱伝達 (流体と固体表面との間での伝熱) 熱放射 熱貫流または熱通過 (伝熱面の壁によって隔てられた二つの流体間の伝熱) 伝熱面 伝熱面積 伝熱管 伝熱板	heat transfer conduction of heat, thermal conduction convective heat transfer thermal radiation overall heat transfer heating surface heating surface area heat exchanger tube heat exchanger plate
物理学辞典 (培風館) 1992年5月	熱伝達 (伝熱工学では固体面と流体の間の熱移動過程を対流熱伝達と呼ぶが、単に熱伝達と呼ぶこともあるので注意が必要)	heat transfer
建築大辞典 (彰国社) 1993年6月	熱移動または熱伝達 伝熱 (熱の移動現象で伝導、対流、輻射の3種あり)	heat transfer
科学技術英和大辞典 (オーム社) 平成5年11月25日	熱伝達、伝熱 熱貫流、熱伝達	heat transfer heat transmission
岩波理化学辞典 (岩波書店) 1996年10月	熱伝達 (伝熱、熱移動ともいう)	heat transfer

しかし、表1に示すように明治20年頃出版された工学字彙には、heating surface を伝熱面と訳している。このことは、当時の先端技術であったボイラの蒸気管の外表面は加熱面であるが、内表面は冷却面であることから、両面は熱を伝える面であると理解して、熱を伝えるという一般語を専門術語らしく、「伝熱」を和字漢語で表示したと思われる。「伝熱」の熟語が使われている個人の文献を見付けたのは、奇しくも今年創立百年を迎える機械学会の図書室であっ

た。機械学会の学会誌 (第1巻、第1号明治30年 (1897年) 12月号に、野上由貞氏が米国から輸入した炉に関する記事「ホーリィ式ダウンドラフトファーネース」で、汽罐の「伝熱面積」の記述があった。その後、伝熱については機械学会誌には、しばしば外国文献の紹介記事の中に伝熱実験、伝熱係数なる熟語が見受けられる。他方、「熱伝達」については機械学会誌 (大正2年4月第1号) の抄録に、1912年のBritish Association 会合の工学に関する

表2 汎用 和・漢・英対訳辞典一覧表

書名 (発行所) 発刊日	和字伝熱用語(語釈)
縮刷大字典 (啓成社) 大正9年3月18日	対流(液体、気体の熱にあひて、循環運動をなすを云ふ) 輻射(物質の媒介なくして、発熱体より熱の四方に出づること)
大漢和辞典 (大修館書店) 昭和30年11月3日	伝熱(熱を伝える) 伝導(熱又は電気を物体の一部から他部に導き伝えはらせる)
広辞苑(第1版) (岩波書店) 昭和38年1月15日	熱伝導(熱が物体の高温部から低温部へ伝わって移動すること) 対流(熱が物質の運動によって運搬される現象) 熱放射(物体を高温度に熱すると、その原子から電磁波が輻射潜として放射される。熱伝達の一法)
新和英大辞典 (研究社) 1974年	熱伝達(heat transfer または heat transmission) 伝熱砂盤(sanndfath)
国語大辞典 (学習研究社) 昭和56年2月1日	熱伝導(熱の伝わり方の一つ。物質内に温度差があるとき、物質内部を伝わって高温部から低温部へと、熱が移動すること) 対流(熱の伝わり方の一つ。液体や気体の一部をあたためた時、その部分の密度が小さくなって上昇し、密度の大きい冷たい部分が下降して起こる循環運動) 熱放射(熱の伝わり方の一つ。隣接する物体によらず、それぞれの温度に応じて物体から放出される電磁波によって、熱が伝えられる現象。熱輻射とも呼ぶ。)
漢和大字典 (学習研究社) 昭和57年12月27日	伝導(熱・電気が物体を伝える現象) 輻射(熱・光が物体からまわりに放射されること)
新漢英字典 (研究社) 1990年	熱を伝える(conduction heat)
広辞苑(第4版) (岩波書店) 平成3年11月15日	熱伝導 対流(対流と同じ) 熱放射(熱輻射と同じで、熱の伝播の一形式)
広辞林(第6版) (三省堂) 1992年1月15日	熱伝導(物質の移動なしに熱が物体の高い方から低い方に移る現象) 対流(液体又は気体が熱せられたとき、循環運動すること) 熱放射(物質の高温に熱した場合に、原子から電磁波が輻射線として放射される現象。温度輻射)

部会で、「熱の伝達に関する実験的研究」が発表され、その内容は「熱したる針金及び管よりの熱の損失増進に関し、運び流れ (convection) と伝導と輻射との比較的価値を定めんと欲した研究である」と紹介されている。

対流熱伝達が学問として一応確立したのは、今世紀に入ってからであり、したがって、日本での伝熱研究の論文が機械学会誌に掲載されるのは大正時代の後半になってからである。大正14年(1925年)の機械学会誌第28巻に、兼重寛九郎先生の「コンデンサー管の熱伝播に就て」(英文題目; On the Heat Transmission through Condenser Tube Wall) が掲載されている。当時の学会誌に“熱は総て伝導、対流、放射によって伝播さるる”という、水銀の熱伝達性を調べた論文摘録の記事もあった。

昭和時代に入ると、有名な抜山四郎先生の「金属と沸騰水との間の伝達熱極大値竝に極小値決定の実験」(Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from a Metal to boiling Water under Atmospheric Pressure) が、機械学会誌、第37巻、第206(Q)号(昭和9年6月)に発表された。実は、この論文の大半は既に昭和4年(1929年)4月3日大阪で開催された、第6期定時総会講演会で発表されており、その後の追加実験が意外に手間がかかり、5年後に誌上発表された経緯がある。この論文では熱伝導率の代りに伝熱率が使われており、参考文献として昭和6年(1931年)に岩波書店から出版された、大賀真二著「伝熱諸論と其適用」が記載されている。

一方、同時代の企業務めの技術者である澤田政雄氏の「熱伝導問題(一元的)」の論文でも、伝熱問題伝熱係数なる熟語が用いられている。

日本の工業分野は第2次大戦終了の1945年以降に、欧米から科学技術の研究開発に関する本、文献、技術導入などによる情報伝達に加え、人の交流によって科学技術分野は急速な進歩を遂げ、戦後30年にして工業先進国となった。産業の復興、発展に伴い、社会生活も向上し、エネルギーの需要が増加して、電力の主力が水力、石炭火力から、石油火力、原子力へ転換し、それに伴って学問的には、熱工学と流体工学から熱流体工学が生まれ、この学問分野の主役として伝熱学、又は伝熱工学が独立、発展して今日では学問領域を越えて、学際的分野に拡大している。伝熱工学のこのような拡張傾向は益々助長されるが、伝熱研究の先進国として、「熱伝達」について、

日本語の専門用語として広く認知されるためにも、統一の見解を纏め普及に努力することが必要である。このことは、表2の中に専門用語として採用されていないことから明らかである。

以上の調査から、「熱伝達」は heat transfer の直訳であると思われるが、「熱伝達」の意義については「伝熱」と同じに伝導、対流、放射の総称として使われる場合と、「熱伝達」を固体表面と流体間の熱移動、すなわち、対流熱伝達に限定する狭義の場合があるが、最近では国際的に見て前者の方が多数派のように思われる。

3. あとがき

「伝熱」という熟語は調査したところでは中国の古典には見当たらず、このことから和文の「熱を伝える」の漢文書きで、日本語の一般用語を漢文化した語と解するのが妥当である。また、明治時代に出版された工学字彙では、heating surface を伝熱面と訳しており、英文からの直訳でもない。この点から、小竹先生が「伝熱という名の学会」の英文表題を「On the Name of the Society "Dennetsu"」と「伝熱」をローマ字で書いたのは正解である。

「伝熱」は「熱伝達」より以前から使われており、「熱伝達」は大正時代以降に heat transfer の直訳として使われだしたと考えられる。したがって、字源から考えると、「伝熱」は一般用語から生れたので、学会名、本の題名などに用いるのが適当であり、「熱伝達」は専門用語として使い分けるのが一つの方法である。

明治時代以降多くの外国の工学専門書が輸入されて翻訳されたが、同一の外国の学術語に対し、語意は同じでも異なる用語を翻訳者によって使っていたため、使う人の意志、知識、又は所属する学協会によって、現在でも異なる用語を用いている。もし可能ならば、早い機会に当学会が他学協会と協力して「伝熱学専門用語を統一するのが、漢字民族の人口が多いアジアでの、今後の科学技術の発展を考える上から必要と思われる。」この調査報告を機会に、ご検討頂ければ幸いです。

最後になりましたが、稀代本「機械工学術語集(機会学会編)」の所在を教えて下された、元玉川大学前田清志教授に感謝申し上げます。

特集「宇宙環境における伝熱」にあたって

Preface to Special Issue: Heat Transfer in Space Environment

第36期編集委員会

小宮山 正治 (大阪大学)

Masaharu KOMIYAMA (Osaka University)

人類の宇宙環境の利用は1957年のスプートニク1号の打ち上げによる人工衛星に始まる。その2年後には微小重力下でのプール沸騰の研究が始められている。1969年のアポロ11号による人類初の月面着陸の成功に続き、その後木星に向けてのパイオニア10号、太陽系探査機としてボイジャー1号による惑星間飛行が行われた。また、1980年代からはスペースシャトルが宇宙機の再使用と人工衛星の回収技術を新たにもたらし、スペースラブの微小重力実験室およびハッブル宇宙望遠鏡など各種の衛星の打ち上げなどに利用されている。

一方、日本における宇宙開発は1950年代の東京大学のペンシルロケットやラムダロケットの打ち上げに始まる。このとき、熊谷ら⁽¹⁾による小型落下塔を使用した無重力下での液滴燃焼の研究が世界に先駆けて実施された。1970年代には日本初の人工衛星「おおすみ」の誕生以後、種々の衛星の実用化がなされ、1994年には純国産のH-IIロケットの打ち上げに成功するに至った。また、1991年には 10^{-5} Gの微小重力環境を10秒間得られる世界で唯一の設備である地下無重力実験センター(JAMIC)が稼働している。さらに、宇宙実験用小型ロケット(TRIA)が1991年来これまで5回打ち上げられ、マランゴニ対流、核沸騰熱伝達、噴霧の生成及び燃焼などの研究に利用されている。1992年のスペースシャト

ル(エンデバー号)によるスペースラブの「ふわっと'92」ではマランゴニ対流や気泡液滴の挙動の実験などが行われた。今後は超流動ヘリウム冷却の赤外線望遠鏡の観測、および大型超伝導磁石による望遠鏡や太陽熱発電の実験も検討されている。

このような背景のもとで最近の伝熱シンポジウムを振り返ると、1988年の第25回では特別セッション「宇宙環境利用の伝熱」が、1992年の第29回ではオーガナイズセッション「航空・宇宙における伝熱」が生まれ、又宇宙環境に関連したテーマのセッションが常にシンポジウムで取り上げられている。このことは微小重力場を利用する研究設備の充実化及び多様化に伴い、宇宙環境における伝熱現象の探究や伝熱技術の向上を目指す機運が高まっていることによると考えられる。そこで、微小重力下での伝熱現象および伝熱技術について諸先生方に解説を賜り、その将来性と問題点をくみ取って頂ければと、今回の小特集を設けた。最後に、執筆者にはお忙しい中から本特集のために快く寄稿していただいたことに深く感謝を捧げたい。

文献

1. Kumagai, S. and Isoda, H., Sixth Symp. (Int.) Combust., (1957), pp.726-731.

臨界点近傍での伝熱現象

Heat Propagation Phenomena in a Near-Critical Fluid

東 久雄 (航空宇宙技術研究所)

Hisao AZUMA (National Aerospace Laboratory)

1. まえがき

臨界点の発見は120年も以前であるが、流体の臨界点はなを謎に満ちている。臨界点は気体と液体の共存する二相領域の先端にある。流体が臨界点に達すると両相の密度は等しくなり、相の境界は消失し、両相を区別することはもはや出来ない。系は二相の相似性により非常に不安定となり、僅かの擾乱にも極端に反応する。これらのことが実験研究を困難にしている。60年代に入り、温度制御系、レーザー系等の実験機器の発達により、熱特性の特異な振る舞い、即ち音速がゼロになること、熱拡散率が消失すること、定圧比熱 C_p 、定積比熱 C_v 、等温圧縮率 k_t が無限大になることが明らかになった。光散乱法による測定により、臨界点に近づくに従い局所密度の散乱がその平均値の周りに増大することが分かった。このことは一個の分子が直ぐ近傍のみならず、より遠くにも影響を与えることを示している。このようなクラスターの広がり相関長、系の支配的な基準となるが、で記述される。異なった系での同様の現象、普遍法則と呼ばれるが、は70年代に繰り込み群理論により理論的に確認された。臨界点現象の研究に流体の果たす特別な役割は、分子論的構造とそのダイナミックスの光学的観測の可能性により与えられる[1]。

臨界点近傍領域伝熱流体現象を考える時、熱力学および輸送特性の殆どが異常性を示し、臨界点座標に対して普遍的(累乗則)関数の形 $[(T_c - T)/T_c]^{-\lambda}$ で表されることを考慮する必要がある[4]。しかし、具体的にはそれほど明確ではないように思われる。例えば、炭酸ガスの熱膨張率は $|\rho^{+-} - \rho_c|/\rho_c = 1.6[(T_c - T)/T_c]^{0.325}$ のように与えられている[5]。また、熱伝導率を

$$\frac{\lambda'}{\lambda'_0} = 1 + \Lambda \left(\frac{T' - T'_c}{T'_c} \right)^{-0.5}, \quad \Lambda = 0.75 \text{ のように与}$$

えて解析を行っている例がある[6,7]。 λ'_0 は完全ガスでの値。因みに超臨界体での熱拡散時間スケールは完全ガスの熱拡散時間スケールよりはるかに

長い。熱容量は $\left(\frac{T' - T'_c}{T'_c} \right)^{-1}$ のように発散するからである。 C_v に比し、 C_p の発散の度合いがはるかに大きく、比熱比 $\gamma = C_p/C_v$ もまた発散する。

このような諸物性値が特異な値を示す状態での流動、伝熱は極めて興味のあるところである。いくつかの文献の中から、宇宙実験に関連した比較的最近の状況を紹介する。

2. 今までの宇宙実験等の紹介

定圧比熱 C_p の測定[1,3]

上に述べた諸特性の中、 SF_6 の定圧比熱 C_p について、Straub教授により、スペースラブミッションD2において見事な測定が行われた。これは1985年のD1での失敗の後、装置を改良して成功したものである。図1に地上1g下での測定、図2に宇宙での測定を示す。 -0.4 K/h の冷却温度速度で広い範囲で正確なデータが得られている。

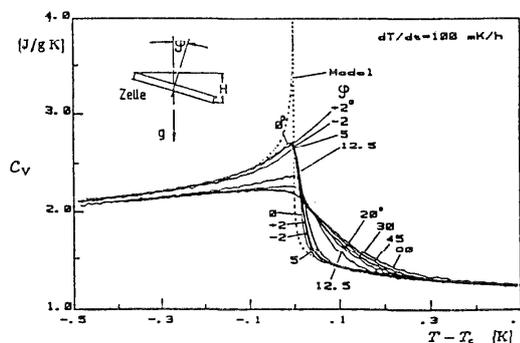


図1 1g下で測定した臨界点近傍の SF_6 の定積比熱 C_v

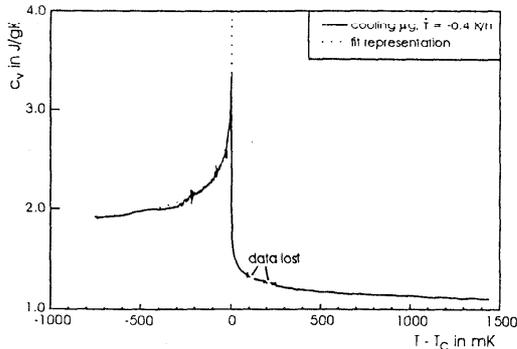


図2 μg 下で測定した臨界点近傍のSF₆ の定積比熱C_v

熱伝達の測定

臨界点近傍の熱伝達の特徴は、熱拡散率が0に近くなるにも拘わらず、熱が音波のように伝わることである[2]。このことは圧縮性の高い流体については早くから指摘されていたことであるが、宇宙実験において明確に測定された。ここでは、筆者らが最近行った地上および落下塔実験での結果を示す。

実験装置はアルミからなる直径60mm、長さ40mmの円筒状のセルである。直径27mm、長さ10mmのキャビティがセルの中心にあり、直径25mm、厚さ10mmのガラス窓で挟まれている。光学観測は直径20mmの窓を通して行う。セルの温度はサーミスタで測定され、セル周りの円筒状のシュラウドにより0.001Kの精度で制御される。炭酸ガスはセル温度を臨界点温度にして適量を導入する。温度場はマッハツェンダー法により観測される。以下のa)の実験ではキャビティ中心に張ったステンレス線(0.1mmφ、26mm l)で加熱した(9.8~38mW)。ステンレス線に直角方向に1mm、4mm 離れて2個のサーミスタを配置して温度変化を計測した。b)の実験ではステンレス線の代わりにサーミスタを配置し、加熱(0.5W、2秒間)を行った。

地上1g下での実験

a) 臨界点近傍では熱は音波として伝達すること

(ピストン効果[4,7,8,9,10])が知られている。地上1g下でもその効果は期待できるはずである。図3に温度の伝達測定結果を示す。ほんの僅かであるが音波による伝達が計測される。

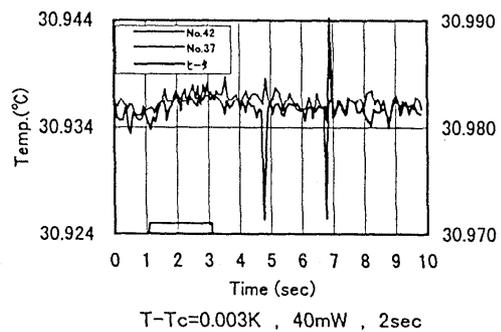
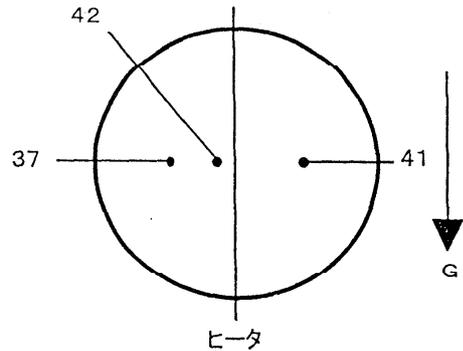


図3 セル内のヒータとサーミスタの配置(上)とヒータ加熱時(2秒間)のサーミスタの温度出力変動(下)

b) マッハツェンダー法による温度場の観測例を図4に示す。サーミスタにより加熱すると、上昇対流が発生し、少し遅れて下降対流が発生する。重力方向の対流は間欠的であり、 $-0.012 K \leq T - T_c \leq 0.015 K$ の範囲でのみ観測される。この範囲は印加パワーの大きさに依存しており、パワーがおおきいと範囲は広がる。温度場プルームの先端の速度は図5に示すように、セル温度の臨界点温度からの差に依存している。臨界点温度に各々最小値、最大値があり、臨界点から外れるに従い、反重力方向と重力方向に進むプルーム先端速度の変化は逆の傾向を示す。もう一つの大きな特徴は、

図6に示すように、サーミスタ加熱からの上下対流の発生遅れ時間である。上昇する対流の発生時間おくれは、およそ0.15秒とほぼ一定であるのに反して、重力方向に下降する対流の発生時間遅れは、臨界点温度で最小となり、セル温度が臨界点温度から外れるにつれて発生時間おくれは大きくなる。

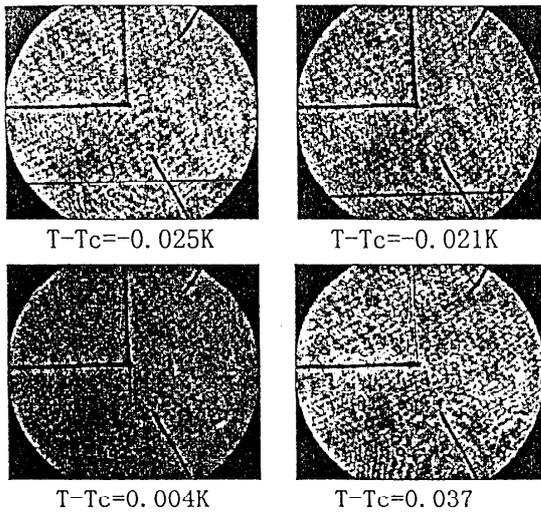


図4 マッハツェンダーによる温度場の観測例
左から中央に延びるのがサーミスタ。加熱による上昇対流、下降対流が見える。

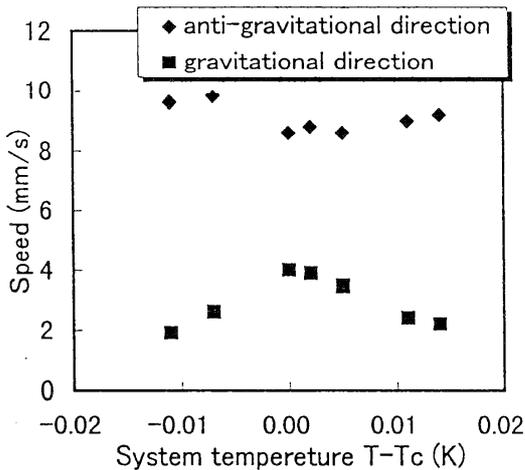


図5 温度場プルームの先端速度
上昇プルームと下降プルームの速度を示す。

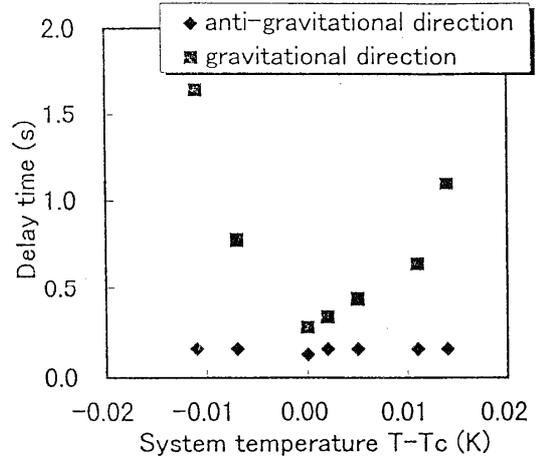
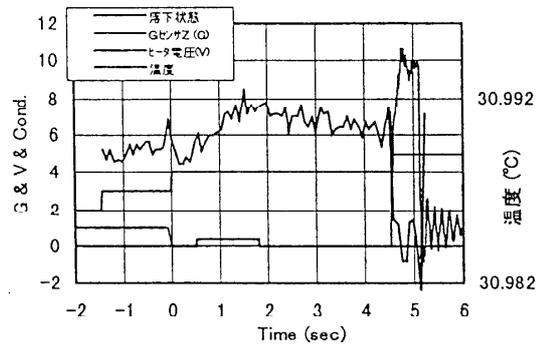


図6 サーミスタ加熱から上昇対流、下降対流発生時間遅れ

落下塔による微小重力実験

a) 温度を臨界点近傍に設定し、攪拌するか、あるいは黒い帯の出来たまま、微小重力下で加熱し、熱伝達を計測した。その一例を図7に示す。ヒータ加熱後瞬時に4mKの温度上昇が計測され、ピストン効果が実証された。カプセル落下時5-10gの減速加速度がかかった時、大きな計測温度変動が観測された。

また、サーミスタによる加熱実験において、 dendryte 状に熱伝導あるいは相変化が起こることが観測された。



ヒータからの距離 = 4mm
T-Tc = +0.01K 38mW 1.3sec

図7 落下塔による微小重力下でのヒータ加熱
(1.3秒間)によるサーミスタの温度出力変動

パワー・時間＝比熱・温度上昇・流量 から比熱を計算すると図7に示した条件の場合、投入エネルギーが総て放出されたとして $38\text{mW} \cdot 1.3\text{sec} = C_v(\text{J/K} \cdot \text{g}) \cdot 4\text{mK} \cdot 3\text{g}$ より、 $C_v \approx 4.1 \text{J}/(\text{K} \cdot \text{g})$ と推定される。臨界点から外れると $C_v \approx 0(1) \text{J}/(\text{K} \cdot \text{g})$ なのでかなり大きくなっていることが分かる。

b) 上記b)と同様の実験を落下塔 (MGLAB、4.5秒の微小重力) で行った。サーミスタによる加熱により地上1g下におけるような対流は観測されなかった。しかし、カプセル着地時、約10g がかった時、図8に示すように上下に対流が起こることが観測された。このことは、加熱により比重の重い部分と軽い部分が発生し、分離して混在していることを示唆している。

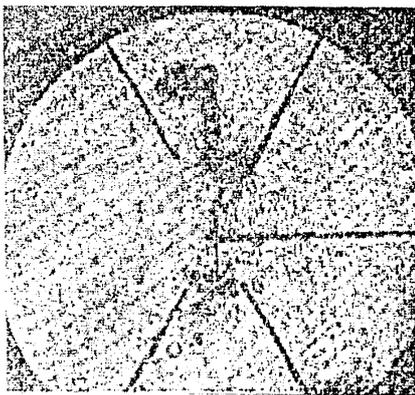


図8 落下カプセル落下中の微小重力下で加熱した時、カプセル落下時に上下に対流が起こる。

3. 理論的説明

このような熱の伝播について、京都大学の小貫氏が最初に巨視的な熱力学により明確な説明を与えた[9,10]。圧力変動は音波のように伝播し時間的に激しく変化する、一方、単位質量のエントロピーは拡散的にしか変化せず、臨界的減速をうける。このことは流体の体積が一定であれば、断熱加熱効果をもたらす。例えば、境界からサンプルが暖められた時、境界近傍の熱膨張は瞬時にサンプル全体に殆ど均質的な圧力増加 δp を生じる。境界から遠く離れていても $(\delta T)_a = (\partial T / \partial p)_s \cdot \delta p$ だけ断熱的に加熱される。図9に諸量の変化を定性的に示す。

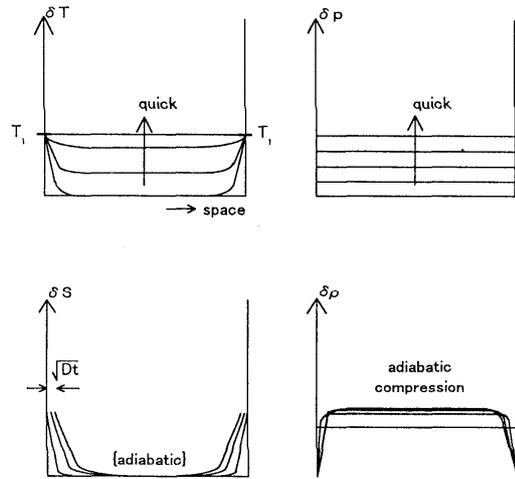


図9 臨界点近傍流体を両壁から加熱した時の諸量の変化

一定の容積Vのセル内のサンプルを考える。圧力の変位 δp の空間依存は無視する。セル内の空間的平均を $\langle \dots \rangle$ で表す。

$$\begin{aligned} \delta T &= \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_p \delta s + \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \delta p \\ &= \frac{T}{C_p} \delta s + T \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \langle \delta s \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

右辺第2項は空間に依存せず、断熱温度変化を表す。ここで

$$\begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_p = 1 - \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s = 1 - \frac{C_v}{C_p} \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma} \end{aligned} \quad (2)$$

を用いてある。全エネルギーの保存は

$$\frac{d}{dt} Q(t) = \rho V C_v \left\langle \frac{\partial}{\partial t} \delta T \right\rangle = \lambda \int d\sigma n \cdot \nabla \delta T \quad (3)$$

であらわされる。今 $\alpha \approx 1$ として、 $t=0$ で境界の

温度を $T_1 = \epsilon_1 T$ だけ変化させたとき、

$|\nabla \delta T| \approx T_1 / (Dt)^{1/2}$ と近似出来て(3)式は

$$\frac{\partial}{\partial T} \langle \delta T \rangle \approx \frac{\lambda}{L \rho C_v} \frac{T_1}{(Dt)^{1/2}} \quad (4)$$

となる。Lをセルの特性長さとして

$$\frac{1}{T_1} \langle \delta T \rangle \approx \frac{1}{L} \gamma (Dt)^{1/2} \quad (5)$$

となり、 $t \sim t_1$ で(5)式は1のオーダーとなる。ここで

$$t_1 = L^2 / \gamma^2 D \propto L^2 \xi^{-2.7} \quad (6)$$

で表される。 ξ は熱的相関長さである。

CNESのZappoli氏は臨界点近傍流体の解析を以下のようにNavier-Stokes方程式、エネルギー式とvan der Waals方程式を支配方程式として、二つの壁に挟まれた、臨界点近傍流体に壁から熱流を与えた時の流体と熱の挙動を解析した[6,7]。

$$\rho t + (\rho u)_x = 0 \quad (7)$$

$$\rho u_t + \rho u u_x = -\frac{1}{\gamma_0} P_x + \frac{4}{3} \epsilon u_{xx} \quad (8)$$

$$\rho T_t + \rho u T_x = -(\gamma_0 - 1) \left(P + \frac{9}{8} \rho^2 \right) u_x \quad (9)$$

$$+ \epsilon \frac{\gamma_0}{Pr_0} \left[\left(1 + \frac{\Lambda}{\sqrt{T-1}} \right) T_{xx} - \frac{1}{2} \Lambda T_x^2 (T-1)^{-3/2} \right] + \epsilon \frac{4}{3} \gamma_0 (\gamma_0 - 1) u_x^2 \quad (10)$$

$$P = \frac{\rho T}{1 - \frac{1}{3} \rho} - \frac{9}{8} \rho^2 \quad (11)$$

熱境界層の厚みは

$$\delta = \sqrt{\epsilon} \mu \left(\frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) = \sqrt{\epsilon} f(\mu, \Lambda) \quad (12)$$

で与えられるが、調和漸近展開法と多重時間スケール解析を適用して熱境界層中と残りの流体中で調和する解を求めた。熱境界層の端での速度は

$$\lim_{Z \rightarrow +\infty} \tilde{u} = \frac{2}{3A} \quad (13)$$

で与えられ、音波の形で残りのバルク流体に機械的な擾乱を起こす。これをピストン効果と称している。即ち、強く膨張している境界層は、大きな圧縮性によって、熱エネルギーを運動エネルギーに変えるのである。

ここで、

$$\mu = \frac{T' - T'_c}{T'_c}, \quad A = \frac{2Pr_0}{3A} \frac{\gamma_0 - 1}{\gamma_0} \left(P_i + \frac{9}{8} \right) \text{である。}$$

図10に境界層内での $t' = 1/2t'_a$ における速度分布

を、図11にバルク領域での速度分布を、臨界点温度からの温度差をパラメータとして示す。ここで t'_a は

$$t'_a = L / \sqrt{\gamma R' T'_c} \quad (14)$$

で定義される特性音波時間である。

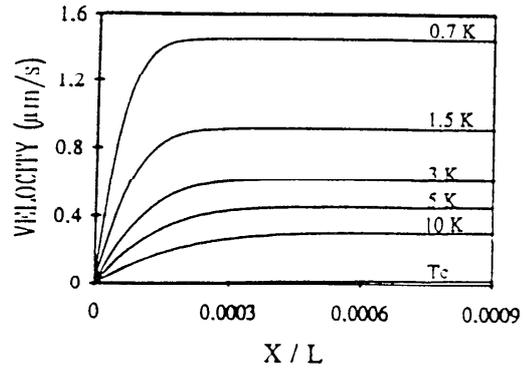


図10 境界層内での $t' = 1/2t'_a$ における速度分布

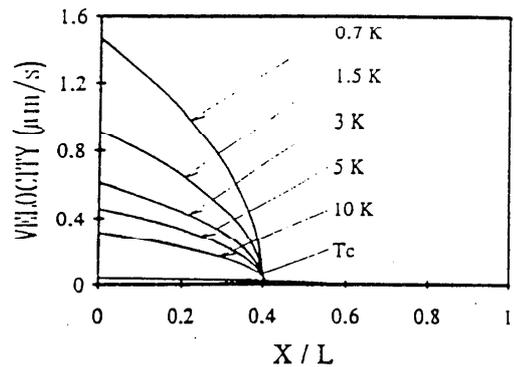


図11 バルク領域で $t' = 1/2t'_a$ における速度分布

東洋大学の前川氏等は以下のような線形化した支配方程式を用い、数値シミュレーションにより、温度の分布、時間変動を極めて短時間 ($\sim \mu s$) から長時間 ($\sim s$) の範囲での求め、熱エネルギーが波動により伝搬することを確認した[11]。また、分子動力学を用いて分子クラスターの生成・解離の様子 ($\sim ps$) を示した (図12)。

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \frac{\gamma - 1}{\alpha_p} \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} = \frac{\lambda}{\rho_0 C_V} \frac{\partial^2 T'}{\partial x_j \partial x_j} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v'_i}{\partial t} = -\frac{\partial P'}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 v'_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (17)$$

$$P' = \frac{1}{\rho_0 \kappa_T} \rho' + \frac{\alpha_p}{\kappa_T} T' \quad (18)$$

また諸量の変化を波動として表したとき、振幅に関して以下の関係が求められている。

$$|v_i|/|T| = \frac{\alpha_p}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_0 \kappa_T}} \quad (19)$$

$$|\rho|/|T| = \frac{\rho_0 \alpha_p}{\gamma - 1} \quad (20)$$

$$|P|/|T| = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\alpha_p}{\kappa_T} \quad (21)$$

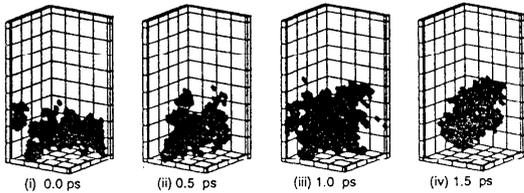


図12 臨界点近傍($T-T_0=4.3K$)で形成されるクラスタ

4. 宇宙での応用

「もう一つの操作は「極低温・攪拌」と呼ばれるものでリーバゴッドがその実行を要請したが、これは極めて一般的な操作である。支援船には酸素タンクは二個しか装備していないが、水素タンクも二個載せてあった。これらのタンクに入れたガスは極めて低い温度、つまり極低温に保たれている。例えば、酸素タンクの場合はマイナス二〇七度まで下がることもあり、この極低温がガスを超臨界密度の状態に維持している。(中略)

確かに酸素タンクと水素タンクは両方とも宇宙船の生命を保ち活動を続けさせる上で同じように重要には違いないが、酸素タンクの方が特に貴重だと言える。何故なら、この二個の酸素タンクには、事実上、搭乗員が呼吸する空気の全量が入っているからである。それぞれの酸素タンクは直径二六インチの球形をしており、重さ三二〇ポンドの酸素を一平方インチ当たり九三五ポンドに加圧して封入してある。タンクのなかには、ちょうど湯加減をみるために浴槽に突っ込んだ指のような恰好で、二本の探針が挿入してある。片方の探針はタンクの上から下まで届く長さがあり、酸素の残量計とサーモスタットを兼ねている。もう一方の探針も直ぐ横に並んでいて、ヒーターとファンを兼ねている。ヒーターとして使うのは、タンク内の酸素の圧力があまり低くなり過ぎたときに酸素に熱を加えて膨張させるためである。ファンとして使うのは、酸素を掻き混ぜるときである—これは、少なくとも一日に一度はEECOMが要請する操作だが、超

臨界密度のガスにはタンク内で層を形成する傾向があり、層ができると残量計の探針が不正確になるからである。[12]

以上はアポロ13号が故障した際に記述から引用したものである。水素、酸素が超臨界状態で貯蔵され、燃料電池の燃料として利用され、電気と水と熱を作り出し、人間の生存には不可欠なものである。しかし、この記述からはタンク内の状態はよく把握できないが、とにかく何とか利用するという印象を受ける。しかし、近年、上述したように臨界点近傍流体の熱流体挙動が段々と明らかになり、より明確に温度、流体の制御を行えると期待される。燃料電池やスペース・プレーンの生命維持用の超臨界酸素タンク(図9)がCNESで検討された[8,13]。タンクの重量とサイズを最小化するため、また必要な時には単一の流体として取り出せるよう、臨界点以上の圧力と低温の超臨界の状態では酸素は貯蔵される。酸素の取り出しによる圧力減少を補償するため、流体は加熱する必要がある。しかし、臨界点近傍流体の特異な性質のために、加熱過程、制御は多くの課題を残している。

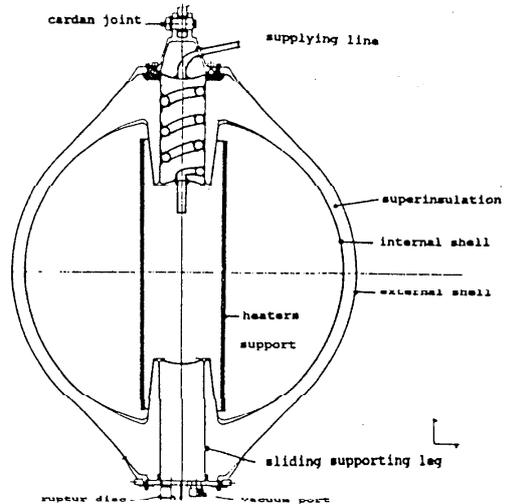


図13 超臨界酸素タンク[13]

おわりに

この分野はヨーロッパで宇宙実験が盛んに行われています。我が国では残念ながら宇宙実験は計画されていませんが、落下実験、解析、シミュレーションで貢献できると思います。臨界点近傍での熱流動の研究とその応用はこれからの分野と思います。筆者はこの分野の実験を数年前から始

めたばかりで、かつ、他文献を勉強しながら寄せ集めでまとめたので、行き届かず、誤りもあるかと思えます。詳細については参考文献をお読みいただければ幸いです。

参考文献

- [1] J. Straup and A. Haupt, "Measurement of the Isochoric Heat capacity C_v at the critical Point of SF₆ under microgravity", 19th, ISTS (1994).
- [2] J. Straub, L. Eicher and A. Haupt, Dynamic temperature propagation in a pure fluid near its critical point observed under microgravity during the German Spacelab Mission D-2, *Phys. Rev. E*, 51, 6, 5556-5563(1995).
- [3] J. Straub, A. Haupt and L. Eicher, Measurement of the Isochoric Heat C_v at the Critical point of SF₆ under Microgravity-Results of the German Spacelab Mission D2, *Adv. Space Res.* 16, (7)27-(7)32(1994).
- [4] D. Beysens, New Critical Phenomena Observed Under weightlessness, *Materials and Fluids Under Low Gravity*, [Springer 1995], p.3
- [5] P. Guenoun, B. Khalil, D. Beysens, Y. Garrabos, F. Kammoun, B. Le Neindre and B. Zappoli, Thermal cycle around the critical point of carbon dioxide under reduced gravity, *Phys. rev. E*, 47, 3, 1531-1540 (1993).
- [6] B. Zappoli, The response of a nearly supercritical pure fluid to a thermal disturbance, *Phys. Fluids A* 4, 1040-1048 (1992).
- [7] B. Zappoli and A. Durand-Daubin, Heat and mass transport in a near supercritical fluid, *Phys. Fluids* 6 (5), 1994.
- [8] B. Zappoli, S. Amiroudine, P. Carles and J. Ouazzani, Thermoacoustic and buoyancy-driven transport in a square side-heated cavity filled with a near-critical fluid, *J. Fluid Mech.*, 316, 53-72 (1996).
- [9] A. Onuki, H. Hao and R.A. Ferrell, Fast adiabatic equilibration in a single-component fluid near the liquid-vapor critical point, *Phys. Rev. A*, 41, 4, 2256-2259(1990).
- [10] A. Onuki & R.A. Ferrel, Adiabatic Heating Effect near The Gas-Liquid Critical point, *Physica A*, 164, 245-264 (1990).
- [11] T. Mackawa and K. Ishii, Temperature Propagation in a Single Component Critical Fluid, to be appeared.
- [12] ジム・ラベル、ジェフリー・スルーガー、アポロ13、河合裕訳、新潮文庫 168-170.
- [13] P. Bravais, Thermodynamic behavior of supercritical oxygen in the terms spaceplane environment condition, Proc. First Europ. Symp. on Fluids in Space, ESA SP-353 (1992).

微小重力下の気液二相流

Gas-Liquid Two-Phase Flow under Microgravity

藤井 照重 (神戸大学工学部機械工学科)

Terushige FUJII (Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University)

1. はじめに

1957年の人類初の人工衛星「スプートニク1号」が打ち上げられて以来、約40年が経過した。その間、1961年「ボストーク1号」による史上初の有人軌道飛行、1969年の「アポロ11号」による人類初の月面着陸、更に最近の我国の宇宙飛行士による活躍等記憶に新しい。国内においては、1970年の日本初の人工衛星「おおすみ」から、純国産技術H-IIロケットを開発し、1996年8月には4号機が打ち上げられた。今後は有翼回収機「HOPE」の開発と共に、米国、ロシア、ヨーロッパ諸国、カナダ及び日本の各宇宙機関が協力する有人の宇宙ステーション「アルファ」（我が国が提供する実験モジュールJEM (Japanese Experiment Module)）の21世紀初頭の完成へと展開されようとしている。いずれにしろ、「地球以外の場で生活すること」の実現を目指して、従来蓄積されてきた既存技術の他に、更に新しい技術の開発が望まれている。これら宇宙開発の展開に対して二相流研究の現状について概説する。

人工衛星などの放熱には発熱量の小さい数kW程度までは外表面窓からの放熱で適正な温度範囲に保持されたが、発生熱量の増加に伴い、重量、耐宇宙塵性等の点から毛細管力で輸送し、熱輸送性能の良好なオールヒートパイプラジエータが採用された。しかし、放熱量の更に大きい場合あるいは積極的な熱管理が必要な有人飛行の場合には、単相流体ループの排熱システム（単相流体ループ式あるいは顕熱利用方式）が採用され、熱媒体としてアポロではグリコール、スカイラブはクーラノール15(500W)、スペースラブはフロン(3~4kW)、スペースシャトルではR-21(18.2~31kW)などが用いられた。しかし、最近数10kWの集中的発熱機器を搭載したフリーフライア、消費電力50~100kWの静止プラットフォーム等の計画もなされ、約110kWの宇宙ステーションも

21世紀の初頭を目指して実現されようとしている。この様な消費電力（排熱要求）の増加に加えて、宇宙機/宇宙構造物の大型化・多目的化による熱輸送距離の長大化（100m以上に及ぶ）によって、二相流体（気液）の潜熱利用方式が注目されてきた。これは液体の蒸発、凝縮現象を利用するので、熱媒体の質量当たりの熱輸送量が増大し、ポンプ動力も大きく低減する。また月面基地等のエネルギー源として太陽熱発電システムを考えた時にランキンサイクルの採用に対して特に二相流体に起因する熱流動の問題が重要な課題となってくる⁽¹⁾。しかし、いずれも未だ実用化されていない。

以上の観点から近年微小重力下における相変化二相流による熱・流動特性が注目され、各種研究がなされつつあるが、まだ設計資料等統一した見解を有するに至っていない。ここではプール沸騰の場合を含めてその研究の一端について概説する。

2. 宇宙環境と物理現象

地球を回る宇宙船のように地球の引力と遠心力とが釣り合った状態では無重量状態が生じる。この様な無重量状態を得るために、落下塔、航空機、小型ロケットさらにはスペースシャトルが利用されている。

2.1 宇宙環境

地球上では得られない特殊な宇宙環境として、1) 微小重力場、2) 超高真空場、3) 放射線場、4) 広範囲な温度場があげられる。特に、スペースシャトルや宇宙ステーションでは10万分の1gの微小重力状態となる。

2.2 微小重力下の物理現象

微小重力下における一般的な物理現象として次のものがあげられ、ここでは表面張力や濡れ性が顕著となる。

- (1) 無対流（密度の差による流体内部の重力対流の消失。一方、温度、濃度差があると表面張力差によるマランゴニ対流が生じる）
- (2) 無沈降、無浮力（比重差のある二物質間、気液分離の問題）
- (3) 無静圧
- (4) 無接触浮遊（非常に小さな力、例えば音波などをかけて空間に安定浮遊保持）

3. 微小重力下の気液二相流研究

3.1 プール沸騰

重力の影響に対する沸騰熱伝達の研究は流体技術の宇宙への科学的、実用的応用への必要性が明らかになりつつあった 1950 年半ば頃に始められた。プール沸騰の研究は中でも最もなされているが、(1) 作動流体、(2) ヒーター形状、材質、表面状態、(3) サブクール度、(4) ヒートフラックスの与え方、(5) 微小重力の質、保持時間などのパラメータに大きく依存し、実験によるばらつきが大きく、或る場合には反対の結果をもたらすなど、統一的な見解を得るまでには至っていない。

1 g と落下塔による μg 下における液体窒素中の沸騰曲線の結果を図 1 に示す⁽²⁾。核沸騰域では μg 下の熱伝達率は、1 g 下とほぼ同じかわずか減少している。一方、CHF はほぼ 1/2 程度に低下し、核沸騰域が維持される熱流束範囲が狭くなっている。また膜沸騰域の熱伝達率は大きく減少している。また、R113 によるサブクール核沸騰開始点近くの沸騰曲線を図 2 に示す⁽³⁾。この場合、気泡は成長を続けるがなかなか離脱しないので、熱伝達は悪くなっている。次に、水中での水平シリンダー上の CHF に及ぼす重力加速度の影響を図 3 に示す⁽⁴⁾。図中、実線は Taylor-Helmholtz の不安定モデルによる Lienhard and Dhari⁽⁵⁾ の地上場の次式である。

$$q_{CHF} = 0.131 \rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \cdot \left[0.89 + 2.27 \exp\left(-3.44 \sqrt{\frac{R}{L_b}}\right) \right] \quad (1)$$

ここで、R はシリンダー半径、L_b は特性気泡長で気泡離脱径である。

微小重力下では沸騰媒体の表面張力と加熱面と

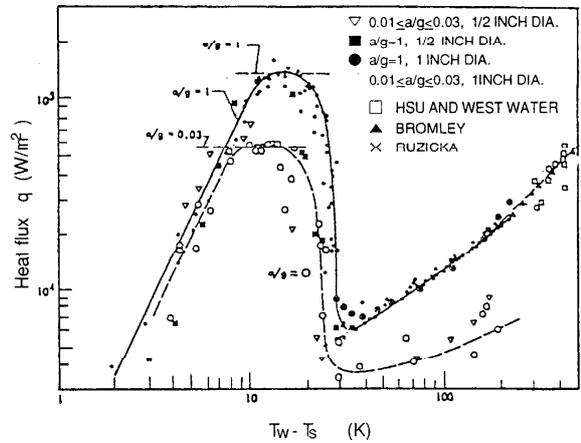


図1 プール沸騰曲線 (LN₂)⁽²⁾

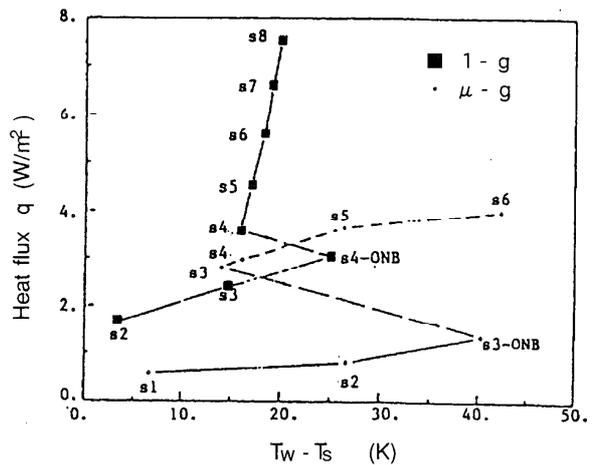


図2 沸騰開始点 (ONB) 近傍の沸騰曲線 (サブクール R 1 1 3)⁽³⁾

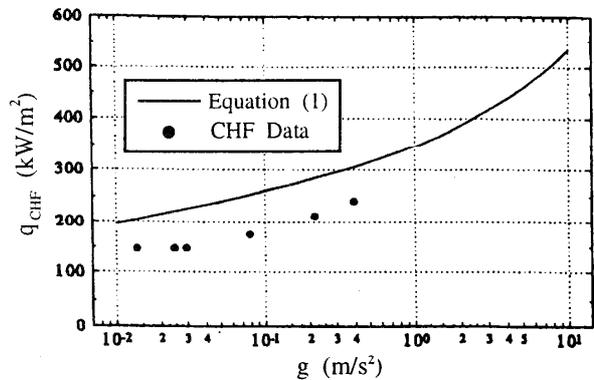


図3 g の変化による CHF (水)⁽⁴⁾

の濡れ性の影響が大きく、各沸騰域で水は顕著な劣化を示すが、ペンタン、フロンでは余り差は認められていない⁽⁶⁾。一般に、1) 各沸騰領域中の沸騰曲線の勾配はほぼ同じである、2) CHF、膜沸騰領域は $g^{1/4}$ 及び $g^{1/2}$ に比例して大きく減少する、3) 自然対流熱伝達率は小さく、沸騰開始点 (ONB) の熱流束は小さい。

一方、このような沸騰熱伝達特性に対して多成分液体を用いることによって、濃度差によるマランゴニ流れの伝熱促進への影響に着目した実験が行われている。非共沸組成の二成分液体、例えば水/アルコールの様に、低沸点の液体の表面張力が高沸点のそれより小さい場合には、気泡周囲に出来た濃度差によって図4のように気泡頂部→低部に向かって流れが生じ加熱面の冷却効果が期待し得る。水・エタノールの非共沸混合系、エタノール 11.3wt% および 27.3wt% の2つの組成に対する実験が北海道上砂川の落下塔で行われ、その結果を図5に示す。図中には参考のために1g下の結果を実、破線で示している。重力の低下にかかわらず伝熱特性の向上することが示されている。

3. 2 二成分二相流

気液二相流の流動・伝熱特性に関しては流動様式が大きな役割を果たす。その基礎的研究として、二成分二相流の研究もなされている。

3. 2. 1 流動様式

落下塔、航空機などを用いて水-空気、水-N₂ガス、水-R22ガス、R113-空気などを作動流体とした実験が行われている^{(8),(9)}。まず、水-N₂ガスで内径 10.5mm、全長 500mm で行った航空機実験のフローパターンの写真を図6に示す。いずれも気泡流、スラグ流、セミアニュラー、アニュラー(環状)流の4つの領域に区分され、各みかけの液、ガス流速 j_l , j_g で示すと図7のようである。環状流への遷移境界は使用する流体の密度比の違いによって遷移の j_g の値が変化する。一般に、気泡流とスラグ流の遷移境界は次式(2)においてボイド率 $0.25 < \alpha < 0.45$ の範囲にある。

$$j_l = \frac{1-\alpha}{\alpha} j_g \quad (2)$$

また、スラグ流、セミアニュラー流と環状流境界は気相先端部と液スラグの界面に働く液スラグを

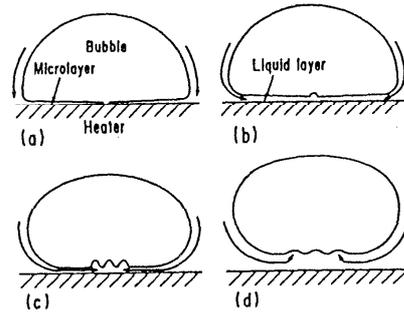


図4 気泡離脱のメカニズムの

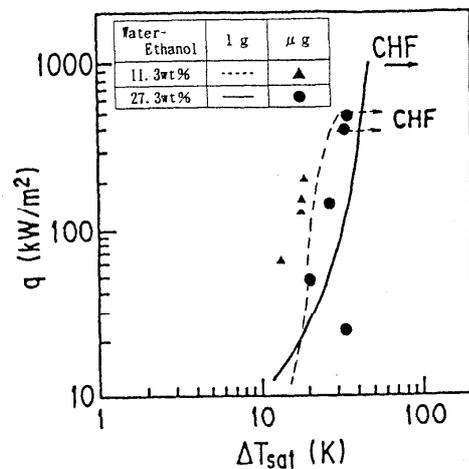


図5 二成分液体の各沸騰曲線

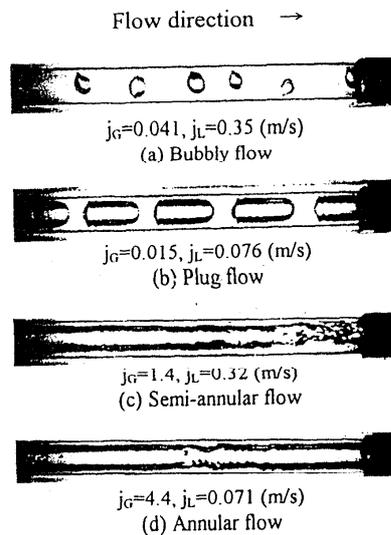


図6 μ_g 下の流動様式 (航空機, 水-N₂ガス)

貫通しようとする気相の力（慣性力）と、それに対抗する力（液の表面張力）のバランスに依存し、これを表すガスのウェーバ数 We_G から、慣性力 \geq 表面張力の条件で環状流が生ずるとして、上記の落下塔実験（水-R22ガス）で $j_g > 1.4\text{m/s}$ 、航空機実験（水-N₂ガス）で $j_g > 2.5\text{m/s}$ で環状流に遷移し、実験結果と良く一致する。すなわち、Zhao and Rezkallah⁽¹⁰⁾は、スラグと環状流の間に Frothy slug-annular flow を定義し、図8の様に各々 $We_G = 1$ と 20 で遷移するとしている。

$$We_G = \frac{\rho_G D j_G^2}{\sigma} \quad (3)$$

3. 2. 2 圧力損失

航空機実験による水-N₂ガスによる摩擦損失を次式の Martinelli パラメータ X を用いて図9に示す⁽¹¹⁾。

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G}} \quad (4)$$

ここで、 $(dp/dz)_L$ 、 $(dp/dz)_G$ は液、ガスが管内を単独で流れた場合の各摩擦損失である。

縦軸は $1g$ 下との比であり、図中の説明文の最初に示す流動様式は $1g$ 下を、() 内は μg 下を示す。これより、 μg 下では全体に大きな値をとり、特に $1g$ 下で波状流領域の摩擦圧力損失は流動様式がセミアンニュラー流に変化したことから他の場合に比べて3倍にも及んでいることが分かる。

また、液相が乱流、気相が層流の時の地上場の Chisholm のパラメータ $C = 10$ に対して、 μg 下で $C = 16$ の次式が得られている⁽¹¹⁾。

$$\phi_L^2 = \frac{(dp/dz)_{TP}}{(dp/dz)_L} = \left(1 + \frac{16}{X} + \frac{1}{X^2}\right) \quad (5)$$

3. 2. 3 ボイド率 α

落下塔、航空機実験で行われたスラグ流領域、環状流領域の結果を図10(a),(b)に示す。特に、環状流領域において微小重力下でのボイド率の減少、すなわち液膜の増大が認められる^{(9),(12),(13)}。

$$\frac{j_G}{\alpha} = C_o(j_G + j_L) + V_{Gj} \quad (6)$$

ここで、 C_o : 分布パラメータ、 V_{Gj} : ドリフト速度である。

3. 2. 4 熱伝達率

Fore ら⁽¹⁴⁾は、空気-水、空気-50%グリセリン水溶液を用いた 2.54cm 管内のスラグ、環状流領域の航空機による減重力下の水加熱の熱伝達率

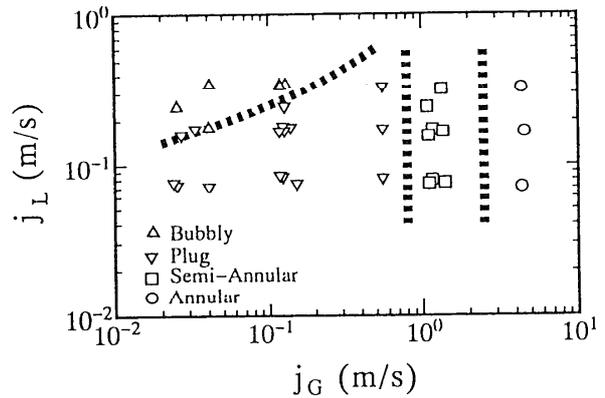


図7 μg 下のフローパターン線図 (航空機, 水-N₂ガス)

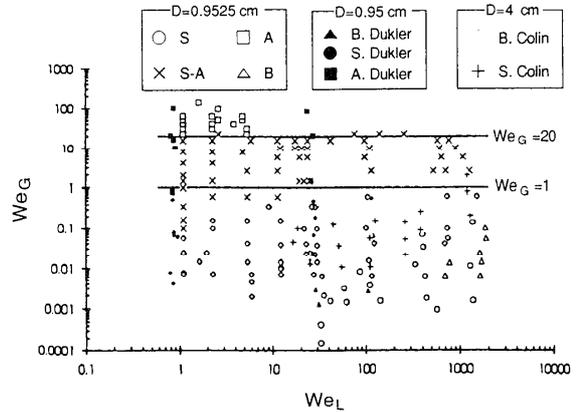


図8 μg 下のフローパターン線図 (航空機, 空気-水) (10)

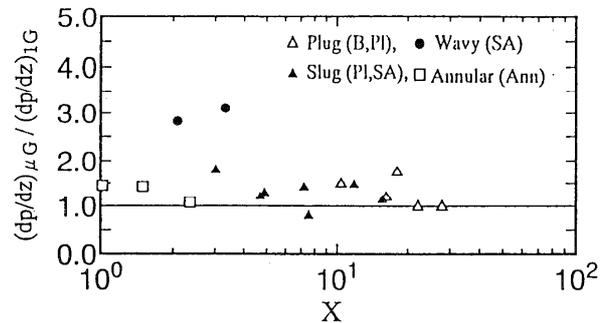
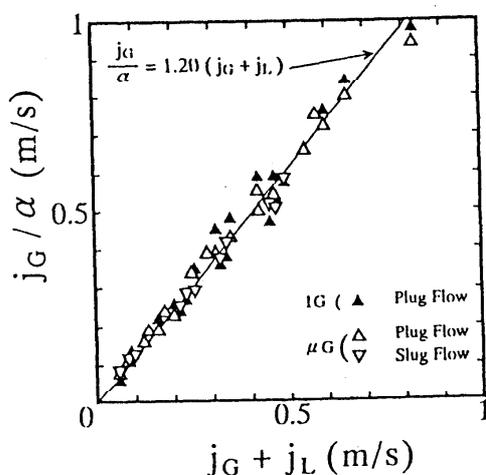
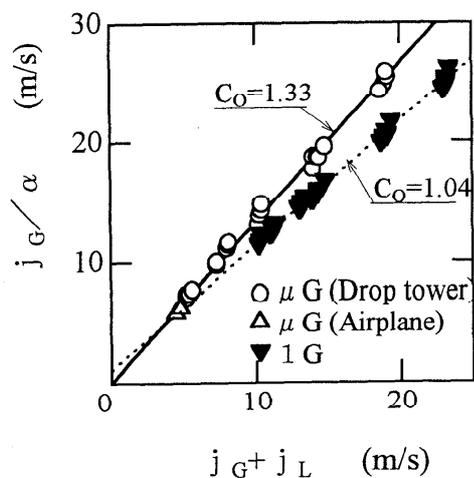


図9 $1g$ と μg 下の摩擦圧力損失の比較 (航空機, 水-N₂ガス)



(a) スラッグ流 (落下塔, 水-R22ガス)



(b) 環状流領域 (航空機, 水-N2ガス)

図10 ボイド率 (水平管)

(平均壁面熱流束 18.7kW/m^2) に対して、次式の相関式を得ている (図11参照)。

$$\text{Nu}_\delta = 0.0152 \text{Re}^{0.684} \text{Pr}^{1/3} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{1/4} \quad (7)$$

ここで、 Nu_δ は液膜厚さに基づいた環状流ヌッセルト数である。

3.3 強制対流沸騰

管内の一成分強制対流沸騰に関する μg 下の研究は定常状態の保持時間の問題や製作がより困難となるために、上述の研究などに比べると少ない。R113を用い、内面の Cl_2Sn 薄膜加熱した $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 垂直管内の落下塔によるフローパターンについてドリフトフラックスモデル式(6)において $C_0 = 1.2$ と仮定して μg 下 ($g = 0.196\text{m/s}^2$) の各遷移のボイド率を表1のように与えている(15)。但し、式(6)において、当然、重力に比べて慣性力が大きい、すなわち、Froude数がある値以上の範囲では重力の影響は小さい。

表1 フローパターンの遷移ボイド率 (垂直管)

	1 g	0.02 g
気泡-スラッグ	0.538 ± 0.025	0.378 ± 0.130
スラッグ-環状流	0.757 ± 0.085	0.794 ± 0.135

次に、R114を用いた水平テストセクション (径 1.58cm) 内の一成分系二相流 (実験範囲: $0.05 < x < 0.86$) のChenら(16)の圧力損失の実験

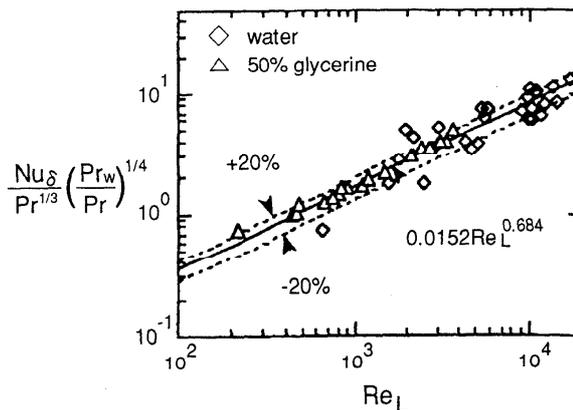


図11 環状流 Nu_δ の相関 (航空機) (14)

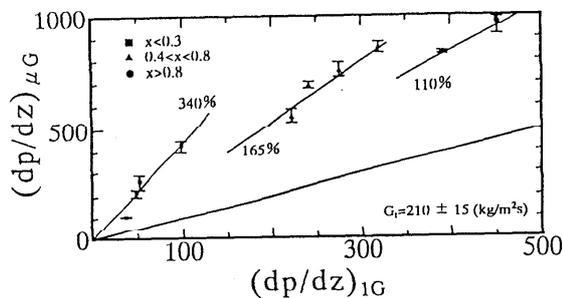


図12 一成分二相流 (R114) の摩擦圧力損失比較

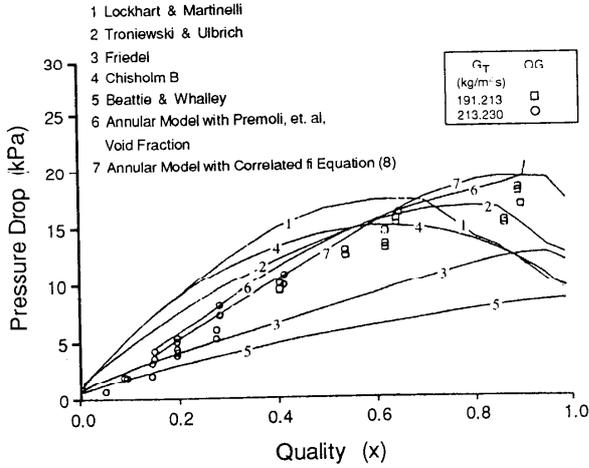
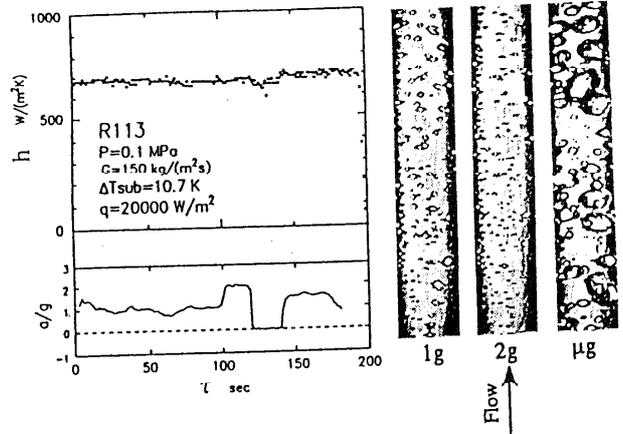


図13 圧力損失の比較
(航空機, R114)⁽¹⁶⁾

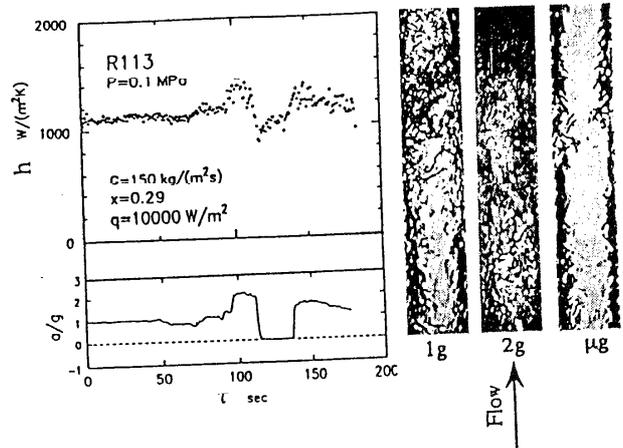
結果を1g、μg下で比較して図12に示す。図中の下側の実線は $(dP/dZ)_{\mu g} = (dP/dZ)_{1g}$ を示す。一般にμg下の摩擦損失は1g下より大きな値をとり、乾き度xによって大きく異なっている。Chenらの報告によると1g下の流動様式(水平管)は、 $x < 0.41$ で層状流、 $0.54 < x < 0.62$ でセミアニュラー流、 $x > 0.86$ で環状流領域であり、μgへの変化によって $0.05 < x < 0.1$ のスラグ流、 $0.15 < x < 0.90$ の環状流とフローパターンの変化による影響と考えられる。すなわち、1-g下ではTaitel & DuklerらやChisholmの層状流モデルと良く一致するが、微小重力下では図13に示す様に式(8)を用いた環状流モデルとの一致が良い⁽¹⁰⁾。

$$f_i = f_g \left\{ 1 + 11.7 \left(\frac{\delta}{D} \right)^{0.039} \right\} \quad (8)$$

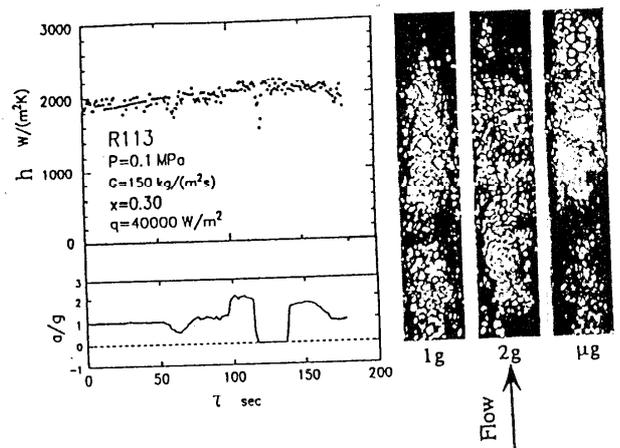
次に、金薄膜を管内面にコートした内径8mm、長さ100mmのパイレックスガラス管内にR113を試験流体とした強制対流沸騰の航空機実験における各質量速度、加熱量に対する沸騰状況と熱伝達率hの関係を図14(a)~(c)に示す⁽¹⁷⁾。図(a)では、gの変化による気泡の大きさに変化がみられ、μg移行後、直ちに気泡は巨大化し、発泡点密度も減少している。また質量速度が高い場合には気泡離脱や気泡径などバルク流からうけるせん断力の影響が支配的となり、gレベルによる沸騰



(a) 気泡流領域 (低質量速度)



(b) 環状流領域 (中熱流束)



(c) 環状流領域 (高熱流束)

図14 熱伝達率と沸騰状況⁽¹⁷⁾

様相の差は極めて小さい。いずれも熱伝達率への g の影響は余り認められない。一方、環状流領域では図 1 4 (b), (c) に示す様に、 μg 下では液膜は滑らかとなり、熱伝達率が悪化している。一方、(c) では、管内面に数多くの発泡点が認められ、この様な場合には g に関係無く、熱伝達率もほぼ同じ値をとっていることが分かる。

4. 結 言

プール沸騰および二相流の流動・伝熱特性に関する研究結果について主に記したが、更に宇宙排熱システムの二相流体ループ（コールドプレート、アキュムレータ、ラジエータ、ポンプを含む）に関する応用的な研究、気液分離装置、スプレー冷却、また気液界面挙動、超音波による気泡や液膜厚さの制御、EHD による熱伝達促進などに関する基礎的研究も行われている⁽¹⁸⁾⁻⁽²³⁾。

文 献

1. 宇宙開発事業団システム技術開発部, 熱発電システム技術の研究調査検討報告書 (1987).
2. Merte, Jr.H., and Clark, J.A., *J. Heat Transfer*, Vol.86 (1964), 351.
3. Zell, M., Straub, J., and Weinzier, A., *Proc. 5th European Symp. on Material Science under Microgravity*, ESA (1984), SP-222.
4. Shatto, D.P., Renzi, K.I., Peterson, G.P., Morris, T.K., and Aaron, J.W., *AICHE Symp. Series*, Vol.92, No.310 (1996), 52.
5. Lienhard, J.H., and Dhir, V.K., *ASME J. of Heat Transfer*, No.95 (1973), 152.
6. 岡利春, 阿部宜之, 森康彦, 長島昭, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.58, No.550 (1992), 213.
7. 阿部宜之, 日本機械学会 P - S C 1 9 4 成果報告書, (1993), 120.
8. 中澤武, 神戸大学学位論文, (1995).
9. 藤井照重, 中澤武, 山田浩之, 村岸治, 竹中信幸, 太田淳一, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.58, No.555 (1992), 62.
10. Zhao, L., and Rezkallah, K.S., *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.19, No.5 (1993), 751.
11. 藤井照重, 中澤武, 浅野等, 山田浩之, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.61, No.585 (1995), 52.
12. 藤井照重, 中澤武, 浅野等, 山田浩之, 吉山孝, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.63, No.606 (1997), 631.
13. Fujii, T., Asano, H., Nakazawa, T., and Yamada, H., *Proc. of 3rd KSME-JSME Thermal Engng. Conf.*, Vol.1 (1996), 6.
14. Fore, L.B., and Witte, L.C., *AICHE Symp. Series*, Vol.92, No.310 (1996), 45.
15. Misawa, M., *Dissertation*, University of Florida, (1993), 77.
16. Chen, I., and Downing, R., *J. Thermophysics*, Vol.5, No.4 (1991), 514.
17. Ohta, H., Inoue, K., Yamada, Y., and Yoshida, S., *ASME/JSME Thermal Engng. Conf.*, Vol.4 (1995), 547.
18. 藤井照重, 日本機械学会誌, Vol.100, No.941 (1997), 96.
19. 日本機械学会, P - S C 1 9 4 成果報告書, (1993).
20. 宇宙開発事業団, 第 2 回「宇宙環境下における二相流体実験」に関するワークショップ, (1990).
21. 藤井照重, 浅野等, 竹中信幸, 中澤武, 山田浩之, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.62, No.594 (1996), 447.
22. Yamada, H., and Nakamura, T., *J. Jpn. Microgravity Appl.*, Vol.12, No.3 (1995), 122.
23. Miyazaki, Y., Ohshima, S., Furukawa, M., and Imai, R., *AIAA-88-2654* (1988), 1.

表面張力対流の挙動

Some Aspects of Marangoni Convection

今石 宣之 (九州大学)

Nobuyuki IMAISHI (Kyushu University)

【はじめに】宇宙環境の特徴は、その微小重力、超高真空、高度な視界などに代表される。地上では重力加速度は約 $g=9.8\text{m/s}^2$ で、落下塔のカプセル中でも居ない限り、その影響を回避することは困難である。従って我々の周囲では浮力が発生し、いわゆる自然対流と呼ばれる流体運動の例には事欠かない。しかし、宇宙環境では、遠心機でも用いない限り定常的な加速度場は得られず、微小な残留 g ($< 10^{-4}g$ や不規則な時間変動 (g ジッター) があるのみで、浮力起因の対流は極めて弱くなり、多くの場合無視できる。しかし、融液あるいは溶液からの多成分結晶成長の実験などでは、液相内の拡散速度が小さいので、このわずかな自然対流ですら無視できない影響を及ぼす。

ところで、半導体単結晶中の不純物の微細な空間的変動の原因は、結晶育成時の高レーレ数下での融液内の自然対流の乱流化にあると考えられた。微小重力実験の黎明期に、スペースシャトル中で結晶を育成すれば自然対流は消滅し均一組成の高品質結晶が得られると期待した。宇宙で FZ (浮遊帯) 法で育成した結晶中には、地上と同様な不均一性が見られた。これは、浮力対流以外に、時空間的変動を示す流れを惹起する機構が存在することを示している。微小重力環境下でも対流を惹起する手段としては、表面張力対流以外に、電場や磁場を印加する方法がある。

【表面張力対流とは】まず、表面張力対流の発生機構の簡単な説明から始めよう。Fig.1 の様な平坦な界面を持つ2次元系を考えよう。界面上の x 方向に表面張力の値が変化しているとき、界面には力が発生し (界面の変形は無視する)、それは隣接する流体中へ運動量として伝播され、液相中に流れを惹起する。表面張力の値は、気液界面上の、温度(T)、界面活性な溶質の濃度(C_i)、オイルなど界面上に展開

する界面相内の吸着量($\Gamma[\text{mol/m}^2]$)等によって変化するので、界面での力のバランスは次式で表される。

$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial x} dx = \tau dx$$

あるいは

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial\sigma}{\partial x} = \frac{\partial\sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial\sigma}{\partial C_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{\partial\sigma}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \quad (1)$$

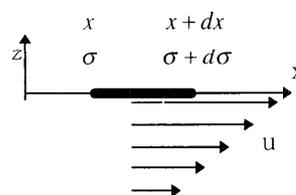


Fig.1 Marangoni effect

以後、 $\sigma_T=(\partial\sigma/\partial T)$ と表記する。

表面張力対流は、その表面張力分布の発生原因によって、Thermocapillary flow(温度分布が原因の場合)、Solutocapillary flow(濃度分布が原因の場合)等と呼ばれる。界面上にこのような力が生じる現象を、イタリアの界面化学者にちなんで、Marangoni 効果と呼ぶ。Marangoni 効果が原因となって生じる流れを定量的に取り扱うには、連続の式、Navier-Stokes の式(運動方程式)、エネルギー方程式(あるいは溶質の拡散方程式)を連立して解かねばならない。

連続の式: $\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$

運動方程式: $\rho\{\partial \mathbf{U}/\partial t + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U}\} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{g}$

エネルギー方程式: $\partial T/\partial t + (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T$

浮力の効果は運動方程式中の外力項($\rho \mathbf{g}$ 項)に体積力として作用する。しかし、マランゴニ効果の場合には、基礎方程式中には現れず、面積力として、運動方程式の境界条件にのみ出現する。

対流の駆動力の項を無次元化するとき、次のマランゴニ数(Ma)とレーレ数(Ra)とが得られる。

$$Ma = -\sigma_T \Delta T d / (\alpha \mu) \quad Ra = -g \rho_T \Delta T d^3 / (\alpha \mu)$$

ここで d は代表長さ、 $\rho_T = (\partial \rho / \partial T)$ である。

[Marangoni 不安定性] 表面張力対流の問題の第一のカテゴリーは、下から加熱された薄い液膜内での対流の問題で、一液相系の Benard(1900)の実験²¹⁾が著名である。熱移動の方向が気液界面に垂直なこの配置の場合、液層上下界面間の温度差がある臨界値を超えるまで液層は静止状態を保つ(静止液層が安定)が、温度差が臨界値を超えると規則正しいパターンを持つ対流セルが発生する。Benard の実験で観察された対流は当初浮力対流と考えられたが、Pearson(1958)²²⁾がマランゴニ効果による対流発生の臨界マランゴニ数 Ma_c を求めた。ピオ数がゼロの場合、 $Ma_c = 80$ である。地上では浮力(レーレ効果)の影響も無視できない。結局、Benard セルの発生条件はレーレ・マランゴニ共存対流の臨界条件を求めた Nield(1964)²³⁾や Kobayashi (1967)²⁴⁾の解析によって初めての定量的に説明された。

このような表面張力対流は、何も熱移動に特有な現象ではなく、界面活性な溶質が液層から放散する(例えばアルコール水溶液からアルコールが気相へ放散する場合にも発生し、界面近傍の液層内の物質移動速度を著しく増加させる²⁵⁾)。また、LiBr 水溶液による水蒸気の吸収速度が、微量のアルコール類の添加で、増大することも知られている^{7,8)}。

Zeren ら(1972)²⁶⁾は上下を定温固体板で囲まれた無限に広い水-ベンゼン二液層を下から加熱した場合のレーレ・マランゴニ共存対流の発生条件を解析した。筆者らも 2 液層系での熱移動時¹⁰⁾および物質移動時^{11,12)}のレーレ・マランゴニ共存対流発生条件の解析を行い、二液層の厚さの比が重要な影響を及ぼすことを示し、実験的にも確認した¹⁰⁾。一方、両層ともに無限に深い二液層内の純マランゴニ対流の発生条件に関する Sternling ら¹³⁾、レーレ・マランゴニ共存対流に対する Reichenbach ら¹⁴⁾の線形解析が報告されている。

最近の宇宙関連の研究では、一液層内のマランゴニ不安定性に関連する研究例¹⁵⁾はあまり行われていない。しかし最近、上下を固体板で囲んだ二重液層¹⁶⁻²⁰⁾あるいは三重液層²¹⁻²³⁾内のマランゴニ対流の問題が注目されている。(微小重力環境では、水-ベンゼン-水といった三重液層も実現可能である!! ただし、容器壁との濡れ性の制御と界面の

平坦性維持が重要。)一液層系でのマランゴニ対流は常に stationary な状態で発生するのに対して、多重液層系では、時間的に変動する oscillatory な解が予測される点が注目されている。

Fig.2 のような二液層系でのレーレ・マランゴニ共存対流の発生条件を線形安定理論で解析する。直線状の温度分布を持つ静止液層を基準状態とし、上下固体板間の温度差を ΔT とする。微細な擾乱速度 w と温度擾乱 T' に対して次の解を想定する。

$$\{w, T'\} = \exp(\gamma_R t + i \gamma_I t) \exp(i\alpha x) \{W(z), \Theta(z)\}$$

γ_R は成長係数でその値の正負で液層が不安定・安定を判別し、ゼロの場合が臨界条件となる。また、 γ_I がゼロの場合には stationary な対流(定常な対流セル)が発生し、 γ_I がゼロでない場合には時間的に x 方向に移動する oscillatory な対流となる。

上下液層の厚さが等しい水-ベンゼン二液層系での対流発生条件は $Ra-Ma$ 座標上で Fig.3 のように表わされる²⁴⁾。ある厚さの液層を上下いずれかから加熱し温度差を増すと、液層の Ra と Ma は、原点を通り勾配 $\phi = Ra/Ma = (gd^2 \rho_T / \rho \sigma_T)$ の細い直線上を推移する。太い実線で表された臨界条件より上では、

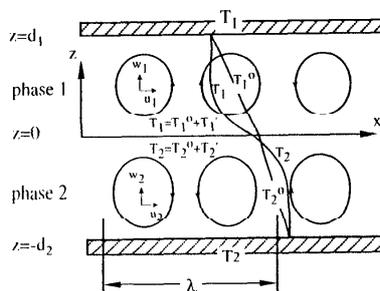


Fig.2 二液層系の例

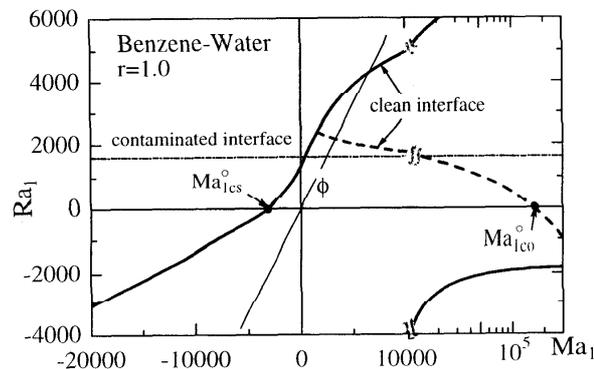


Fig.3 $r=d_1/d_2=1.0$ の二液層系での $Ra-Ma$ 対流発生条件 (水-ベンゼン系:伝熱時)

stationary な対流が発生する。水-ベンゼン系では、微小重力下でベンゼン相側から加熱($Ra=0, Ma<0$)するとき stationary な純マランゴニ対流が発生する。一方、水側から加熱($Ra=0, Ma>0$)するときには、oscillatory な純マランゴニ対流が発生することがわかる。しかし、二液層の液深比 $r(d_1/d_2)$ の値が重要な因子で、Fig.4 に示すように、 $r > (\alpha_1/\alpha_2)^{0.5}$ のみ oscillatory な対流が発生し、 $r < (\alpha_1/\alpha_2)^{0.5}$ では、 $Ra=0$ の条件下では stationary な対流のみになる。

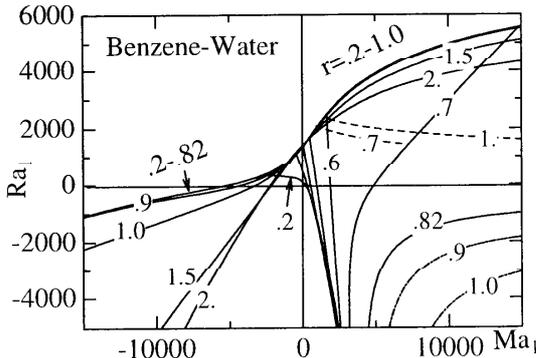


Fig.4 液深比の影響(水-ベンゼン系：伝熱時)

地上で下から加熱する場合にはレーレ効果支配になりがちで、マランゴニ効果は浮力対流を抑制する。しかし液層が薄い場合には、マランゴニ効果が支配的となり oscillatory な対流が発生する。地上でこの状態を実験するには、二液層の厚さを 2mm 以下程度にしなければならず、詳細な測定・観察は困難である。しかし、微小重力環境下では、液層を厚くしてもマランゴニ効果支配なので、実験が容易になり、液層内の流速や温度分布の測定も可能になると期待される。多重液層内の oscillatory なマランゴニ対流についての線形解析¹⁵⁻²⁰、弱非線型解析²¹、非線型数値解析²²や宇宙実験(1994)²³などが行われたが、まだ振動型対流に関する詳細な宇宙実験は見られない。

[Thermocapillary flow] 前節の問題では、熱移動の方向は界面上に垂直で、元々界面上の温度分布は存在しないが臨界温度差を超えると、液層中の弱い擾乱によって界面上の温度分布が惹起され、流れが増幅された。一方、Fig.5a のように常に表面上(x 方向)に温度勾配が存在する系では、わずかな温度差でも対流が生じる。このような表面張力対流を、マラ

ンゴニ不安定性の問題と区別して Thermocapillary flow と呼ぶ。底面が断熱で、左右の壁温が異なる液層内の対流の挙動を 2 次元数値解析すると Fig.5c のように、表面の流体は高温壁から低温壁へと移動する 1 個のロールセルを形成する²⁵。セルの中心は低 Pr 流体では低温壁近傍に、高 Pr 流体では高温壁近傍に出現する(Fig.5d,e 参照)。通常の液体($\sigma_T < 0, \rho_T < 0$)の場合、レーレ効果とマランゴニ効果は共に強め合う方向に作用する。液層が浅くなると、体積力で駆動される浮力対流は弱くなるが、表面力で駆動される表面張力対流は維持される。

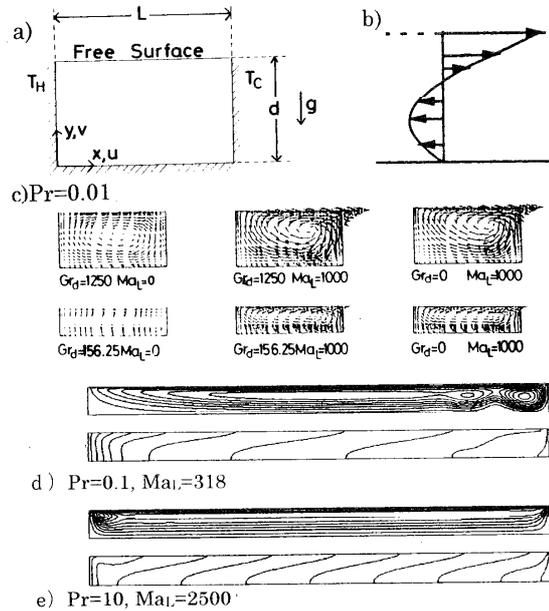


Fig.5 Thermocapillary flow アスペクト比の影響

さて、この液層を薄くし温度差を大きくするとき、2次元数値解析は Fig.5d,e のように小さなサブセルに分裂する傾向を示す²⁶。更に薄くしてレーレ効果が無視でき左右の側壁間の温度差が小さい場合、表面張力対流の結果液層の中央部分には Fig.5b の速度分布が出現する。Smith ら(1983)²⁷は、この表面張力対流の 3次元擾乱に対する安定性を線形解析し、前述のマランゴニ不安定性とは別の新しい不安定化現象の存在を示唆した。

$$\{u', v', w', T'\} =$$

$$\{U'(z), V'(z), W'(z), T'(z)\} \exp\{i(\alpha x + \beta y - \gamma t)\}$$

左右の側壁間の温度差が小さいと、Fig.5b の流れが安定に存在する。x 方向の温度勾配 $b = dT/dx$ [K/m]

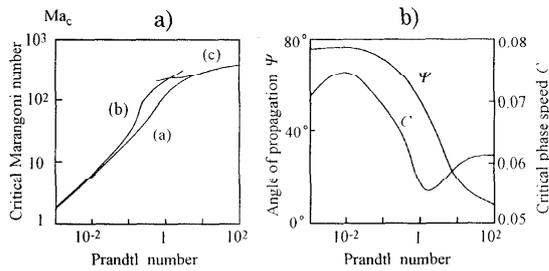


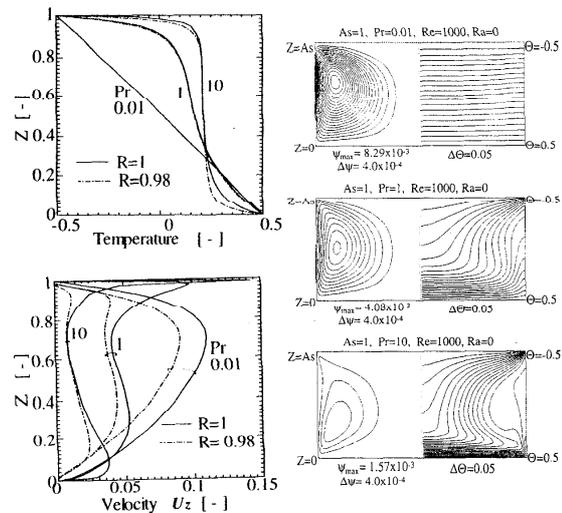
Fig.6 Hydrothermal Wave の発生条件と傾斜角、位相速度の Pr 依存性。

を増すと、この状態は不安定となり 2 次流れが生じる。この場合 $Ma = \sigma \tau b d^2 / \alpha \mu$ と定義すると、2 次流れの臨界条件 (Ma_c) は Fig.6a 中の線 (a) に示す Pr 依存性を示す。 $\Psi = \tan^{-1}(\beta/\alpha)$ とするとき、2 次流は、x 軸から $(90 - \Psi)^\circ$ 傾いた軸を持ち、それに直角な方向に位相速度 c で移動するロールセル (traveling hydrothermal wave) となる。同図 b より、 $Pr \rightarrow 0$ の場合には縦渦 ($\Psi = 90^\circ$) に近づき、Pr 数が大きくなるにつれて横渦 ($\Psi = 0$) に近づくことが分かる。Fig.6a 中には縦渦 ($\alpha = 0$) 発生の臨界条件 (線 (b) $Pr < 3$) および横渦 ($\beta = 0$) の発生の臨界条件 (線 (c) $Pr > 0.5$) も記入してある。Bi が大きくなると基準流れは安定化し、2 次流れの発生には $Bi = 0$ に対する結果 (Fig.6a) より大きな温度勾配 (Ma) が必要となる。

Neitzel ら²⁸⁾ はシリコンオイルの薄い液膜で実験しロールセルが斜め方向に移動し、液が厚く $Bo = (g \rho r d^2 / \sigma \tau) > 0.2$ ではレーレ効果が無視できず、 b の増加とともに基準流れ \rightarrow 定常マルチセル流 \rightarrow 移動セルと遷移するが、 $Bo < 0.2$ では線形論の予測どおりに、基準流れ \rightarrow traveling hydrothermal wave へと直接遷移することを確認した。彼らは、炭酸ガスレーザシート光を、液表面のロールセルの沈み込み線 (他の場所より低温度) に照射することでこの 2 次流れを抑止出来ることを示した。

【液柱内の表面張力対流 I】 間隔 L 置いた 2 枚の円板 (半径 a) の間に液体を挟むことで浮遊帯を形成できる。円板の温度をそれぞれ異なった値 ($T_H, T_C, \Delta T = T_H - T_C$) に設定すると、マランゴニ対流が発生する。温度差が小さければ、定常で軸対称なトロイダル状の対流セルを形成する。

通常の流体では温度の上昇とともに表面張力の値は減少するので、液柱表面の流体は高温板から低



$$Re = Ma/Pr, As = L/a, \Theta = (T - T_m) / (T_H - T_C), T_m = (T_H + T_C) / 2$$

Fig.7 液柱内の軸対称表面張力対流の状況

温板に向けて運動する (Fig.7)。Pr が大きい流体の場合、温度勾配は固体板近傍に集中し、そのため表面流速は両固体板近傍にピークを持つ。しかし、表面からわずかに内部の流速は滑らかな分布形状を示す。Pr が小さい場合には温度分布は余り歪まず、表面流速は強く分布も単調である。

このような形状の液柱を half-zone liquid bridge とよび、浮遊帯 (FZ) 法による結晶育成時の液柱 full-zone liquid bridge (中央部で高温、両端が低温) の簡単なモデルとして良く用いられる。

通常の流体は $\sigma_T < 0$ であるが、n-ヘプタノールの水溶液は $T^* = 30^\circ\text{C}$ 近傍で表面張力が極小値を示す。この溶液を用いて、固体板温度を T^* を挟むように設定し、液層内に 2 個のロールセルを発生させる意図で行われたロケット実験 (液柱ではなく矩形容器を用いた) は失敗した²⁹⁾。

しかし、 $T^* = 725\text{K}$ で表面張力の極大値を示す溶融苛性ソーダ (NaOH:融点 601K) を用いた地上実験では Fig.8 に示した様々なパターンが観察された³⁰⁾。この実験は、直径長さそれぞれ 2~3mm 程度の小型液柱を用いて、地上においてもレーレ効果の影響をほぼ完全に除去している。融点が高いため液柱表面から周囲気体への放熱が無視出来ず、円板間温度差が小さいと表面上に最低温度が発生し、full-zone 液柱に類似してくる。A) 両円板の温度を等しくする

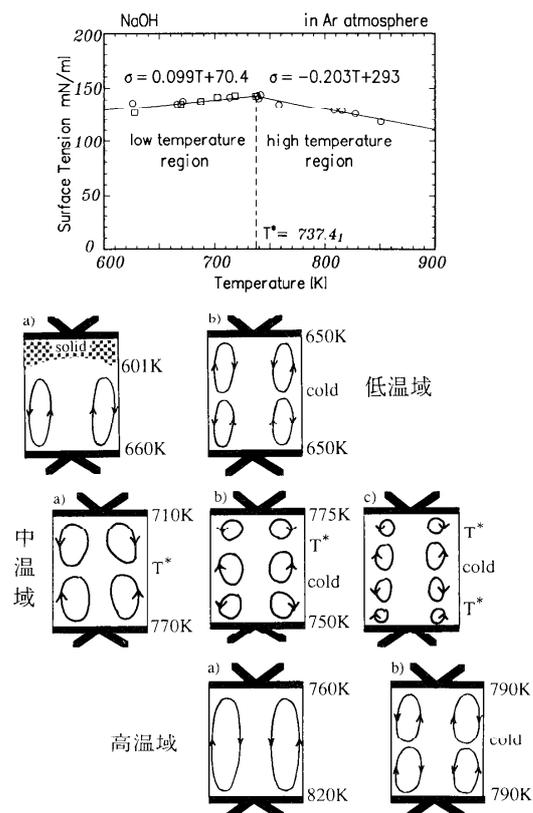


Fig.8 溶融 NaOH の表面張力と液柱内に生じる表面張力対流パターンの模式図

と、最低温度は中央に生じる。両円板の温度を T^* より十分高く設定した場合、通常の流体と同様な対流が発生する。また、B) 両円板の温度を T^* より低温側に設定すると、融液表面温度はどこでも $\sigma_T > 0$ となり、通常と逆に表面は低温部から高温部へと流れる。A、B いずれの場合にも、円板間温度差の大きさによってロールセルの個数は1個か2個になる。一方の円板の温度を T^* より高温に、他方を T^* より低温に設定して ΔT を大きくすると、液表面上に T^* が生じ、その点に向かって吸い込まれる1対のロールセルが生じる。また、両円板の温度を T^* を挟んで、 ΔT を比較的小さく設定した場合には、表面上に最低温度点と T^* とが出現し、液柱内には3個のロールセルが観察される。さらに、両円板温度を T^* より少し高温で $\Delta T = 0$ に設定すると、液柱表面の中心に最低温度点が生じ、円板との間に上下にそれぞれ T^* が生じる。従って、上下にそれぞれ T^* へ向かう表面流が発生し、2対4個のロールセルが観察される。

溶融 NaOH の低温域($\sigma_T > 0$)での対流は、高温域($\sigma_T < 0$)での流れに比べて、表面流の向きが逆転しかつ極めて遅いという特徴がある。表面が断熱($Bi=0$)の場合には単に流れの向きが逆転するのみであるが、表面から放熱があると違いが生じる。 $\sigma_T < 0$ の場合には、表面の液体は高温部から低温部へ、外部へ放熱しながら流れるため、表面温度勾配は大きく、マランゴニ効果は顕著に作用する。一方、 $\sigma_T > 0$ の場合には、低温流体が表面に現れ高温部へと移動する。表面への熱供給は、中心部を逆方向に流れる高温液からの熱伝導に依存するため、表面温度勾配は小さく、流れは弱くなるのである。加熱される場合にはこの逆になる。

[液柱内の表面張力対流 II 振動流] half-zone 液柱内のトロイダルセル流れは、板間温度差が小さい場合には軸対称定常流(Fig.7)である。しかし、温度差を増すと、軸対称定常流は不安定になり、3次元振動流へと遷移する。この件に関する実験はこれまでに、地上および微小重力下で数多く試みられ、使用液体は、溶融シリコン($Pr=0.01$)³¹⁾からシリコンオイル($Pr=5\sim 200$)まで多岐にわたっている³²⁻³³⁾。

これまで知られている事をまとめると、以下のようになる。

1. 軸対称定常な流れは、ある臨界温度差以上では3次元振動流に遷移する。
2. 3次元振動流は、Fig.9のような流れパターンが一定速度で周方向に回転する場合と、回転せずにパルス状に振動する場合とが見られる。温度差が大きい場合回転型になる傾向が強い。
3. トレーサの運動や液晶による温度の可視化の結果などから、周方向の波数 m (整数:1, 2, 3, 4...) の擾乱が存在する。アスペクト比 ($As=L/a$) が大きい場合には m は小さく、 As が小さいほど m は大きくなり、 $m \approx 2/As$ なる近似式が成り立つ。

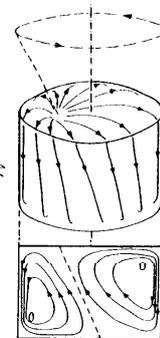


Fig.9 3次元流

の特徴の。一方、軸対称定常流に次式の3次元微小擾乱が加わったとき、軸対称が不安定になり3次元流に遷移する臨界条件を求める線形安定解析が行われ³⁴⁻³⁶⁾、真円柱状で液面変形をしない液柱内軸対称流の3次

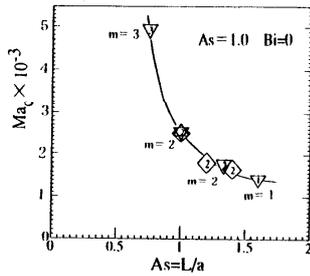


Fig.10 3次元流への遷移条件：MacのAs依存性

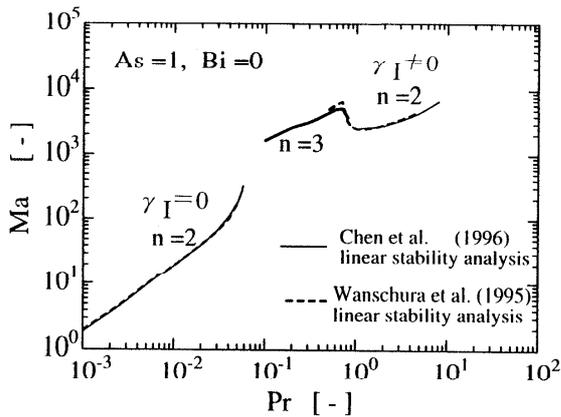


Fig.11 MacのPr依存性 (As=1.0, Bi=0)

$$\{u', v', w', T'\} = \{U'(r, z), V'(r, z), W'(r, z), T'(r, z)\} \exp\{m\theta - \gamma t\}$$

元流への遷移に対する臨界マランゴニ数と対応する擾乱の周方向波数mのAs依存性(Fig.10)³⁸⁾、MacのPr依存性(Fig.11)³⁵⁻³⁶⁻³⁷⁾等が得られている。Pr<0.3での3次元流への遷移時には常に $\gamma_I=0$ で、低Pr流体の液柱内の軸対称定常トロイダル流は、定常な3次元流れに遷移すると予測される。一方高Pr流体の液柱では、軸対称定常流が不安定化すると直ちに振動流化($\gamma_I \neq 0$)すると予測され、前述のhydrothermal wave型の2次流れとの類似性が議論されている。

観察される振動流は、流れ場と温度場が結合した非線型複合事象で、数値実験による詳細な検討が望まれる。最初に非線型数値解析を行ったRuppら³⁹⁾はAs=1.2のhalf-zone液柱において全てのPr領域(0.007~200)で、m=2の回転型の振動解を得た。

一方、Lebenstamら⁴⁰⁾はPr=0.01のシリコンについて非線型数値解析を行い、Ma=19.6で最初に3次元定常流に遷移し、さらにMa=62.5において振

動流へと再遷移する結果を得ており、最初の遷移については線形安定解析と一致した。

筆者ら⁴¹⁻⁴²⁾はBi=0、Pr=1.02の液柱で、As=0.75、1.00、1.33、1.60の4条件について数値解析を行い、次の結果を得た。

1) 臨界マランゴニ数以上では、微細な不規則擾乱(例えば計算誤差など)が原因となって3次元の振動型マランゴニ対流へと遷移する。(ただし、Fig.12の計算例では擾乱の成長促進のため途中で短時間非対称放熱境界条件を加えた。)

2) 非線型数値解析から求めた臨界マランゴニ数およびその時の振動数の値は、線形安定論による値と3%以内の誤差で一致する。

3) 臨界マランゴニ数の近傍では、As=0.75、1.00、1.33、1.60の液柱内に生じる3次元振動流の周方向の波数はそれぞれ、m=3、2、2、1で、線形論の予測と一致する。

4) 最初に誘起される振動流は非回転のパルス状振動流である。しかし、As=1.33、1.60の場合は時間経過とともにパルス状振動は不安定化し、回転型の振動流に遷移する。Maの値が小さいほど(Macに近いほど)、パルス状の振動形態が長時間持続する。

5) As=1.0の場合、Maの値が小さいと、m=2のパルス状振動流が生じる。しかし、Maが大きくなるとm=3のパルス状振動流が生じ、さらに大きなMaの下では回転型振動流に遷移する。

6) 3次元数値解析コードでは定常解が得られない場合でも、2次元軸対称を仮定した解析コードでは定常解が得られる場合がある。

これらの回転型3次元振動流の流れ場、温度場の構造はどうなっているのだろうか？

Pr=1.02、Bi=0、As=1.60、Ma=2220で3次元数値解析を行うと、Fig.12 aに示すように速度や温度が振動し3次元振動流が発生する。最初、Fig.12 bに示すパルス状振動を行うが中心近傍の温度振動の位相が狂いはじめ、やがてFig.12 cの回転型の振動流へ移行する。この段階では、固体板上の局所Nuは振動を続けるが、平均Nuは一定値を示す。同図dには回転振動のある瞬間における、表面でのベクトル、等温線、z=0.5Asにおける水平断面内の速度ベクトルと等温線を示した。Fig.12eには、2次元定常軸対称解との偏差の分布が示されている。

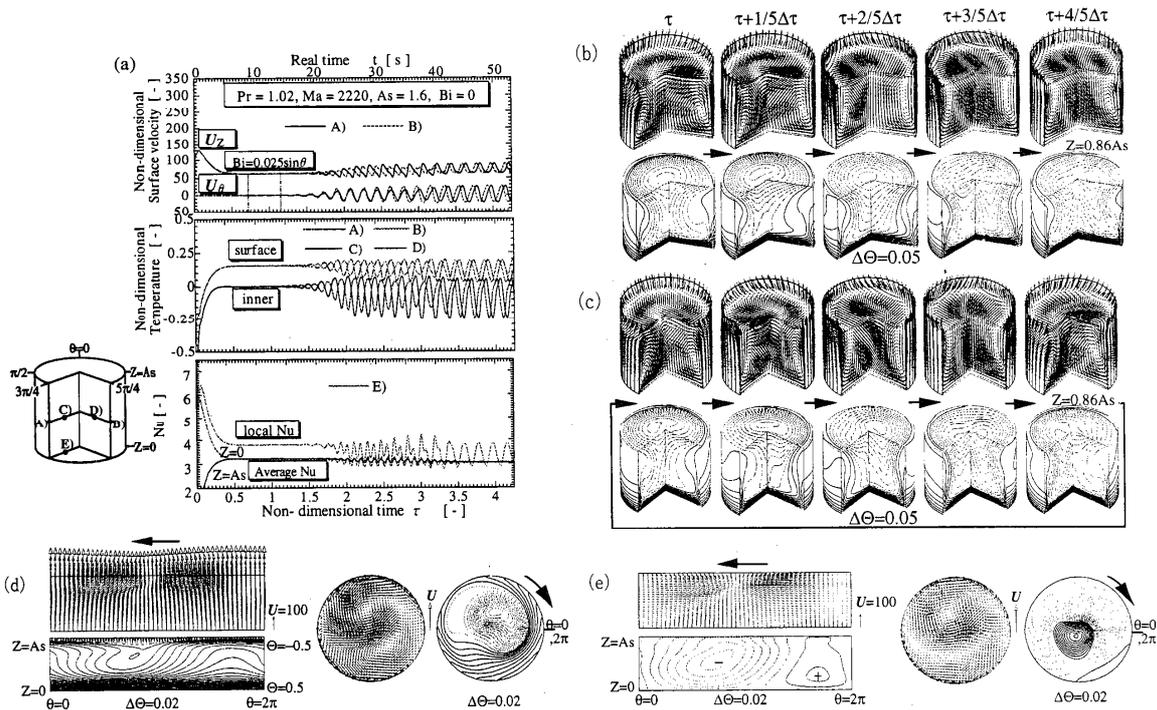


Fig. 12 液柱内に生じる 3次元振動型マランゴ対流の数値解析例 ($As=1.6, Ma=2220, Bi=0$)

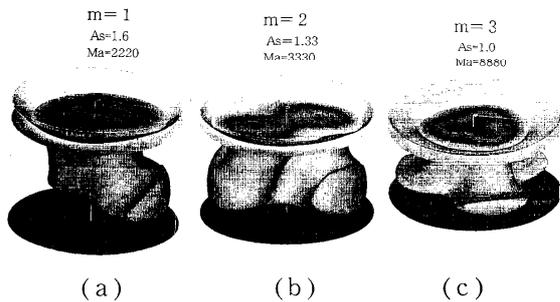


Fig.13 回転型振動流における等温面の立体構造。

Fig.12c に示した回転型振動流の温度分布を回転座標から見ると、Fig.13a に示した等温面の構造が現れる。 $m=1$ の回転型振動流は、中心軸からそれた 1 本の低温プリュームが振じれながら下降する基本構造を持ち、それが一定角速度で一方向に回転する状態である。ある場所に置かれた熱電対で測定した温度変動の 1 周期間に、この構造が 1 回転する。Fig.13b の条件では、 $m=2$ の非軸対称構造を持ち、低温流体が 2 本のプリュームに分裂して振じれながら下降しつつ一定角速度で回転する。ある場所に置かれた熱電対で測定した温度変動の 1 周期間に、この構造が 1/2 回転する。Fig.13c には $m=3$ の回転型振動流の等温面を示した。

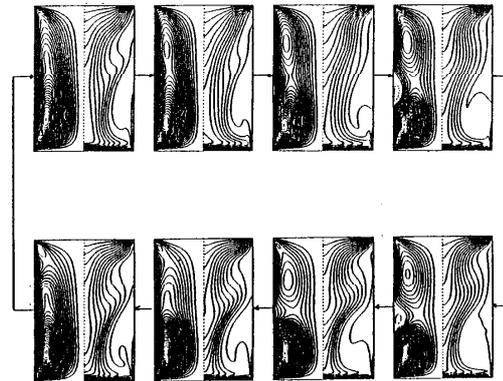


Fig.14 軸対称振動流($m=0$)の流れ関数と等温線の時間変化：($Pr=3.4, Ma=37314, Bi=0$)

これまで $m=0$ の解(軸対称振動流)は現れなかった。しかし、軸対称を仮定して非定常解析を行うと、 Ma の値がある臨界値を超えると振動流($m=0$)へと遷移する。この場合の流れ関数と温度分布の変化挙動の例を Fig.14⁴³⁾ に示した。この振動挙動は、矩形容器内の振動流に関する Peltier ら⁴⁴⁾の結果と類似している。線形エネルギー安定論⁴⁵⁾によると、軸対称定常流は、軸対称振動流($m=0$)より非軸対称振動流($m \neq 0$)に対して、より不安定であることが分かっており、軸対称振動流よりも、非軸対称振動流の方が

発生し易いと予測している。しかし実際には、As や Ma の値によってさまざまな振動形態が生じる。これは、与えられた条件下で成長速度が最も大きいモードの擾乱が優先的に成長するため、多形が生じるのである。

一方、最近の微小重力実験から、振動流への遷移条件は臨界マランゴニ数のみでは表現不可能か？との疑問も生じている⁴⁶⁾。すなわち、液柱サイズが大きくなると、 Ma_c の値がサイズに比例して増大する傾向が生じる。Fig.12 の数値解析では、 $Ma=2Ma_c$ 程度では、微小擾乱が観察可能になるまで成長するのに $vt/a^2=1\sim 2$ 以上の待ち時間を要する (Ma_c では無限時間必要)。液柱サイズの 2 乗に比例して増大する待ち時間と、大型液柱の臨界マランゴニ数のサイズ依存性の関連は今後十分な検討を要するが、もし臨界マランゴニ数で整理できないならば、全く別の不安定化機構を考えねばならない。Kamotani ら⁴⁷⁾ は液柱表面の微小変形振動が重要な因子であると主張しており、今後の宇宙ステーション実験などで、液柱サイズの効果などを詳細に検討して、振動流発生機構の正確な理解が望まれる。

[おわりに] 以上、必ずしも宇宙環境での話題に限らなかったが、表面張力対流に関する話題のいくつかの説明を試みた。温度以外の要因による流れ、例えば異種液体が接触した直後の濃度差表面張力対流による混合促進⁴⁸⁾も、自然対流による混合が期待できない宇宙での混合には有効である。また、密度差による浮力が働かない微小重力下での気泡・液滴分離の一策として、周囲の液体中に温度勾配を付与し表面に生じるマランゴニ対流によって気泡・液滴を高濃度側へと移動させる手法⁴⁹⁾など、非日常的な環境に特有な現象も見られる。さらに、微小重力下での沸騰⁵⁰⁾や結晶育成などで、マランゴニ効果が果たす役割についての解析が進むと期待される。

微小重力環境の流体-流体界面を考えるとときに重要となる、液体と固体との濡れの制御も含めて、表面の関与するこれらの現象に興味を持っていただければ幸いです。

[引用文献]

1)Eyer, A. et al.: J. crystal Growth, **71**,173(1985)

- 2)Benard, H.:Rev. generales Sci. appl., **11**,1261(1900)
 3)Pearson J. R. A.: J. Fluid Mech., **4**, 489 (1958)
 4)Nield D. A.: J. Fluid Mech., **19**, 341 (1964)
 5)Kobayashi R.:Zeit. Angew. Mathe. Phys.,**18**,845 (1967)
 6)今石、鈴木、宝澤、藤縄:化学工学論文集、**81**27(1982)
 7)柏木ほか:機械学会論文集 **51**,463B,1002 (1985)
 8)Hozawa M. et al.: J. Chem. Eng. Japan, **24**,209(1991)
 9)Zeren R.W., Reynolds, W.C.: J. Fluid Mech., **53**, 305 (1972)
 10)Imaishi N., Fujinawa,K.: J. Chem. Eng. Japan, **7**,87 (1974)
 11)Imaishi N., Fujinawa K.: ibid. **7**, 81(1974)
 12)Imaishi N. et al.: ibid **13**, 360 (1980)
 13)Sternling C.V., Scriven L.E.: A.I.Ch.E.J.,**5**, 514(1959)
 14)Reichenbach J, Linde,H.:J.Colloid Inter.Sci.,**84**,433 (1981)
 15)Dupont O. et al.:Int. J. Heat Mass Trans.,**35**, 3237(1992)
 16)Wahal S., Bose A.: Phys. Fluids, **31**, 3502(1988)
 17)Nepomnyashchy, A.A.et al.:Sov. Phys. Dokl.,**34**., 420(1989)
 18)Nepomnyashchy A. et al.: Microgravity Q., **5**, 130(1995)
 19)Colinet P.et al.: Phys. Review, **E54**, 514(1996)
 20)J.-Fernandez, J. et al.: Microgravity sci. techn., **9**, 245(1997)
 21)Duh J. C.: Microgravity Sci. Technol., **7**, 98(1994).
 22)Georis Ph. et al.: Phys. Fluids **A5**, 1575(1993)
 23)Georis Ph., Legros J.C.: in Ratke L. et al. ed. " Materials and fluids under low gravity", Berlin; Springer; p. 299(1996)
 24)Jing C.J. et al.:Microgravity sci. techn., in press.
 25)Hirata, A. et al.: J. Chem. Eng. Japan, **22**,275(1989)
 26)飯田ほか:日本マイクロ重力応用学会誌,**13**,309(1996)
 27)Smith, M.K. et al.: J. Fluid Mech., **132**, 119(1983)
 28)Neitzel, G.P. et al.: Proc. 2nd Eur. Symp. Fluid in Space, 272 (1996)
 29)Limburg-Fontaine, M.C., et al.: Phys. Chem. Hydrodynamics, **6**,301(1985)
 30)Yasuhiro, S. et al.: Microgravith sci. techn., **7**,112(1994)
 31)日比谷ほか:日本 μ 重力応用学会誌,**13**,105(1996)
 32)Schwabe D. et al.: J. Crystal Growth, **46**, 125(1979)
 33)Velten D. et al.: Phys. Fluids, **A3**, 267(1991)
 34)Carotenuto L. et al.: in Ratke L. et al. ed. " Materials and fluids under low gravity", Berlin; Springer; 331(1996)
 35)Neitzel G.P.et al.: Phys. Fluids, **A5**, 108(1993)
 36)Wanschura M. et al.: Phys. Fluids, **A7**, 912(1995)
 37)Chen, G. et al.: J. Crystal Growth, in press
 38)Kuhlmann H.C.: private communication (1997).
 39)Rupp R. et al.: J. Crystal Growth , **97**, 34(1989)
 40)Levenstam M., Ambrg G.: J. Fluid Mech., **297**, 357(1995)
 41)Imaishi N. et al: Proc. 2nd Europ. Symp. Fluids in Space, p.67(1996)
 42) Imaishi, N. et al.:Proc. 10th ISTP (Kyoto: 1997) in press
 43)安廣、今石: 九大機能研報告、**8**,23 (1994)
 44)Peltier, I.j. et al: J. Fluid Mech.,**257**,339(1993)
 45)Neitzel, G.P. et al.: Phys. Fluid, **A3**, 2841(1991)
 46)Masud, J. et al.: J. Thermophys. Heat Transfer, **11**,105 (1997)
 47) Kamotani, Y.: private comunication
 48)Yasuhiro, S. et al.:Microgravity sci. tech.,**7**, 112(1994)
 49)Velarde, M.G.: in Ratke L. et al. ed. " Materials and fluids under low gravity", Berlin; Springer; p.283(1996)
 50)Straub, J. et al.: Proc. 2nd Europ. Symp. Fluid in Space, p.317(1996)

宇宙エネルギーシステムにおける液滴冷却器

Liquid Droplet Radiators in Space Energy System

羽賀 一男 ((財) 原子力発電技術機構)

Kazuo HAGA (Nuclear Power Engineering Corporation)

はじめに(1),(2)

宇宙活動が盛んになるほど必要なエネルギー量が増すが、そのエネルギーは大量な熱を効率良く捨てる技術がないと確保できない。そこで放熱設備の総重量を格段に小さくでき、分割輸送が容易になるものとして液滴放熱器が注目されている。本文では液滴放熱器の基本、設計例、実験研究につき、文献(1)の紹介を中心に述べる。Fig.1は液滴放熱器を組込んだ一対のランキンサイクルソーラ発電衛星の概念を示す。

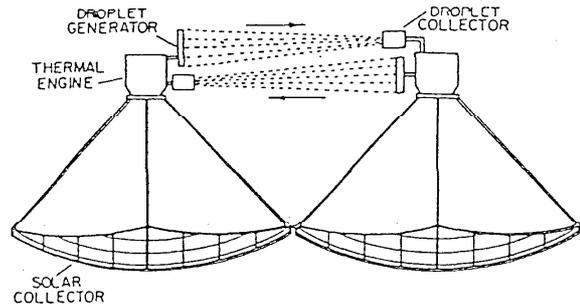


Fig.1 二重モジュールソーラ発電衛星(1)

1 液滴放熱器設計の基礎(1)

1.1 液滴シートの光学的厚み τ

液滴放熱器では、液滴エミッターから放出された液滴がシートを形成して空間を飛び、コレクターに回収される。

液滴シート内では隣接液滴で遮られる空間が少ないほど各液滴からの放熱には良いが、放熱器形状を合理的にするため、シートがほとんど不透明であるほどに液滴が密に詰め込まれる。液滴シートは個々の液滴の固有等方放射率 ϵ_0 とシート表面に法線方向の光学的厚み τ ($\tau = n\sigma S$) とで特徴付けられる。ここで、 n : 単位体積当り液滴数、 $\sigma = \pi a^2$ 、 a は液滴半径、 S : 液滴シートの厚み。この定義ではシートを垂直に通過する光の割合は、液滴が黒体 ($\epsilon_0 = 1$) の場合 $e^{-\tau}$ である。

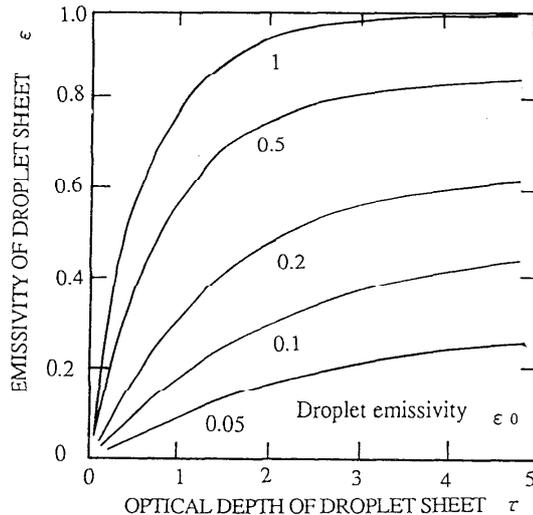


Fig.2 液滴シートの光学的厚みと放射率の関係(1)

1.2 τ と液滴シート総体の放射率 ϵ との関係

τ と ϵ との関係は、シート内での液滴の等方分布と等方な放射、反射を考慮した非線型積分方程式の解として Fig.2 に描かれている。図は ϵ_0 が小さい液滴から成るシートでも τ が大きくなると ϵ は ϵ_0 より大きくなり、 τ が 2~3 でその効果は飽和する傾向を示す。これは低放射率液滴では近隣の液滴から受けた熱が大部分反射されることによる。

1.3 放熱量/液滴シート質量

個々の液滴の表面積当りの質量は $\rho a/3$ である。ここで、 ρ : 液滴密度。一方液滴シートの表面積を

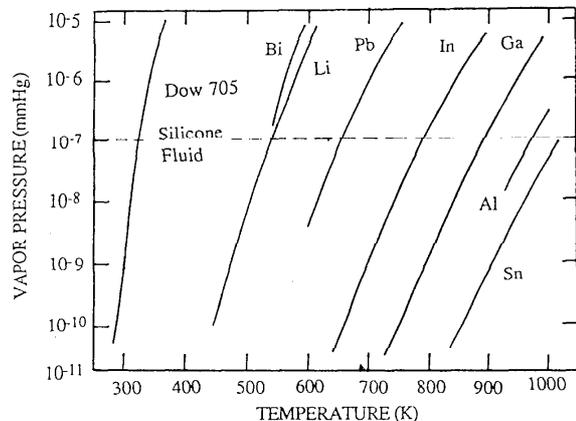


Fig.3 放熱器作動流体候補の温度と蒸気圧の関係(1)

Aとすると、シートの質量Mは $M=n \cdot 4/3 \cdot \pi a^3 \cdot \rho$ AS。放熱面積当たりの質量はM/2Aであり、この比(比質量)の値は結局個々の液滴の場合の 2τ 倍となる。さらに $\tau=1$ を仮定し、後述するように高温領域での作動流体として優れた錫($\rho=6.8\text{g/cm}^3$, $\epsilon_0=0.1$)を用い $2a=100\ \mu\text{m}$ とすると、M/2Aの値は 0.22kg/m^2 である。また、Fig. 2から $\epsilon=0.17$ が得られ、放熱量/液滴シート質量は一個の黒体液滴の場合の $0.085(=0.17/2)$ 倍となることが判る。

放熱量が同じなら、放射率と放熱面積は反比例関係にある。したがって、同一放熱能力の液滴放熱器の質量を M_d 、放熱面積を A_d 、放射率を ϵ_d 、比質量を w_d 、従来型ヒートパイプ付放熱器のそれらを、それぞれ、 M_h 、 A_h 、 ϵ_h 、 w_h とすると、

$$\frac{M_d}{M_h} = \frac{A_d w_d}{A_h w_h} = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_d} \frac{w_d}{w_h}$$

ここで、 ϵ_h は ~ 0.8 、 w_h は $5 \sim 10\ \text{kg/m}^2$ である。こうして、 M_d/M_h の値は上記の錫液滴シートの場合従来型放熱器の $1/5 \sim 1/10$ となる。ただし表面積は液滴シートの方が放熱板より大きい。

液滴の放射率を上げる手段としてカーボンの様な放射率の大きい粒子で液滴の表面を包むことが考えられる。この粒子は液体を混濁しない方が望ましく、この面からも表面張力が大きい液体金属が液滴放熱器の作動流体として優れている。

なお、液滴放熱器を成り立たせるためには、液滴のエミッタとコレクター、循環ポンプ等が必要であるが、それらの質量は液滴冷却器のメリットをそこなうものにはならないであろう。

1.4 蒸発損量

液滴流れからの蒸発速度は、蒸発分子のビューファクターが輻射光子のものと同じだという点で輻射によるエネルギーの散逸と相似である。シートの実効輻射面積が光子のさえぎりにより個々の液滴面積の和より小さい様に、液滴シートの実効蒸発面積は近隣の液滴による蒸発分子の妨げにより個々の液滴表面積の和より小さい。温度Tでのシート単位面積当たりの質量損失は、 E_3 を指数積分とすると、

$$\frac{dm}{dt} = 2[1 - 2E_3(\tau)] \frac{\rho(T)}{(2\pi RT)^{1/2}}$$

蒸気圧が $p(T) = k_c \cdot T^v / T$ (T_v は飽和温度)で、温度の時間変化が $dT/dt = -\sigma \epsilon T^4 / (2\tau \rho C_p)$ で表されるとすると、ある過渡時間の間、単位面積当たりの質量

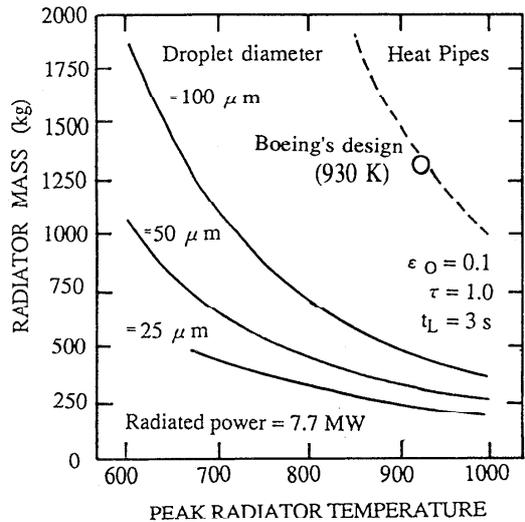


Fig.4 7.7MWを排熱するのに必要な放熱器質量(1)

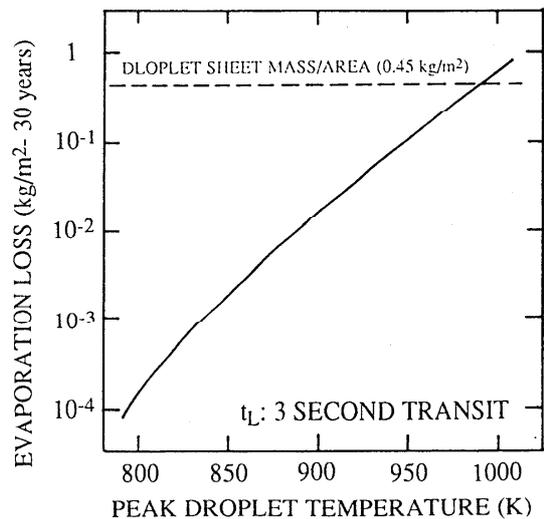


Fig.5 30年使用後錫液滴冷却器のピーク液滴温度と作動流体蒸発損量の関係(1)

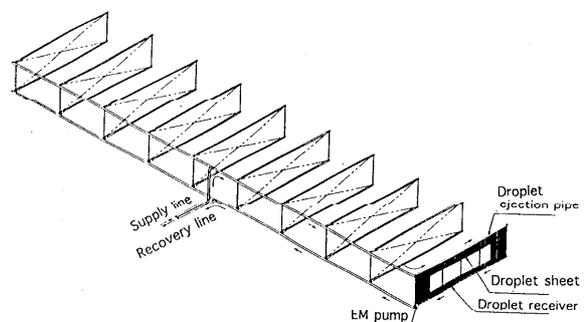


Fig.6 月面発電プラント設計で採用された液滴放熱器システム(3)

損失は、適切な液体を選べば $T_v > T_0$ であり

$$\Delta m(\text{transit}) \approx \frac{p(T_0)}{(2\pi RT_0)^{1/2}} \frac{T_0}{T_v} \frac{2\rho C_p}{\sigma T_0^3} \frac{1-2E_3(\tau_i)}{(\epsilon_i/2\tau_i)}$$

温度が低下すると蒸気圧は急激に低下するので、蒸発の大部分は空中へ放出されると直ぐに起きる。ここで、 T_0 :液滴放出温度、 ϵ_i :局所放射率、 τ_i :局所光学的厚み。

放熱器の供用時間を30年間とするとその間の作動流体の損失量は、 $\Delta m(\text{transit})$ を液滴の飛行時間 t_L で除して得られる平均質量損失率にその時間を乗じることにより、

$$\Delta m \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot 30\text{yr}} \right) = 10^8 p(T_0) \frac{T_0}{T_v} \frac{\xi}{f^3 - 1} (M/T_0)^{1/2}$$

$$f = T_0/T_1$$

ここで、 M :分子量、 p :蒸気圧(mmHg)、 T_1 :液滴回収温度。 T_0 と T_v は1000K単位の値である。 $\xi = [1 - 2E_3(\tau_i)] < \epsilon_i/2\tau_i > / (\epsilon_i/2\tau_i)$ は常に1以下で、 $\epsilon_0=0.1$ 、 $<\tau_i>=1$ ならば $\xi=0.47$ 。この面積当たりの蒸発質量が液滴シートの比質量と同等以下であるには、ピーク液滴温度での蒸気圧は $< 10^{-7}\text{mmHg}$ が要件となろう。なお $<>$ はシートの平均値を示す。

1.5 作動流体の選択

液滴冷却作動流体の主要件は蒸気圧力が低く、運転条件が多少変わっても広範囲で液体であることである。Fig.3に液滴放熱器に適した液体の蒸気圧と温度との関係を、Table1にそれらの物性値を示

す。これらの液体は低蒸気圧、高熱伝導率、高表面張力、熱サイクルと放射線損傷に強い、という観点から選ばれた。

500~1000Kの範囲では1000Kでも蒸気圧が十分に低い錫が最も適している。350~550Kの範囲では錫-鉛-ビスマス低融点合金 (Table2参照) が考えられるが、各要素の蒸気圧の違いで使用中に組成が変わり得る。室温付近では、シリコン拡散ポンプ油、すなわちDow 705が魅力がある。

2 液滴冷却を使った放熱器設計例

2.1 ソーラランキンサイクル(1)

Fig.1に示した熱機関設計のピーク温度は1242K、凝縮器温度は930K、熱効率率は19%であるが、放熱器として従来のヒートパイプ付き放熱板の場合は170kg/MWと見積もられた。一方、Fig.1の液滴冷却器では1000Kで放出された直径100 μm の錫液滴が飛行中に数100K低下するとする。液滴生成プレナムの圧力を4MPaに設定すると、液滴速度は34m/sとなる。 t_L を3sとすると、液滴流長さおよびソーラコレクター直径 L は100m。コレクターの反射率 R_{rad} を0.9、ソーラエネルギー密度 I_s を1350 W/m²とすると、受熱量 dQ_H/dt は

$$dQ_H/dt = (\pi/4)L^2 I_s R_{\text{rad}} = 9.5 \text{ MW}, \text{ 放熱量 } P_{\text{rad}} \text{ は } 7.7 \text{ MW} \text{ である。}$$

Fig.4に放熱器ピーク温度と放熱器質量の関係を示す。図から、930Kでは液滴直径 $2a$ が100 μm の場合でも、液滴冷却方式はヒートパイプを使ったボーイング社設計の従来型の1/3.5の質量であることが判る。また $2a=25\mu\text{m}$ の場合は、質量は1/7になる。高放射率粉の添加により液滴の放射率が0.5に上げられれば、質量はさらに1/2~1/3となる。

$2a=100\mu\text{m}$ 、 $\epsilon_0=0.1$ 、 $t_L=3\text{s}$ である錫液滴シートで

Table 1 液滴冷却器用低蒸気圧液体の物性値(1)

物質	融点 [K]	融解熱 [J/s]	比熱 [J/g-K]	熱伝導率 [W/cm-K]	密度 [g/cm ³]	表面張力 [d/cm ³]	分子量
ガリウム Ga	303	80.1	0.41	0.33	6	740	69.7
インジウム In	429	28.4	0.27	0.42	7	600	114.8
リチウム Li	453	410	4.22	0.42	0.5	350	6.94
錫 Sn	505	59.4	0.26	0.33	6.8	550	118.7
ビスマス Bi	545	52	0.15	0.16	10	370	209
鉛 Pb	600	23.8	0.15	0.15	10.5	420	207.2
アルミニウム Al	933	389	1.08	0.84	2.3	900	27
Dow 705	-	-	1.67	-	1.0	37	546

は液滴回収温度は732 Kとなり、シート面積 $A=P_{rad}/(2\sigma\epsilon T_e^4)$ は990m²と計算される。また放出時の液滴シートの幅 $W(=2A/L)$ は20 m。移動方向液滴の間隔を液滴直径の~5倍とすると600,000本の液滴流が必要で、液滴エミッタ上の放出孔間隔が1mmではシートの幅は3.7cmとなる。なお単位面積当り30年間の蒸発損量は、ピーク放熱器温度を1000Kとすると、Fig.5に見るようにシートの比質量と同程度(0.45kg/m²)である。

2.2 月面原子力発電プラント(3)

「月面エネルギー基地調査会」で検討された2.7MWe月面原子力発電プラントでは、液滴冷却器で7.3MWを排熱するとしている。そこでは、地面に並行で間隔が4.6mの10対の液滴放出管と液滴回収器との間に直径約50μmのリチウム液滴から成るシートを考え、放熱器全体の質量を15.9tonと推定した。リチウムの放熱温度は510K、回収温度は400Kである。この放熱器は分解し、配管類は巻いて、輸送機の直径4.6m、長さ8mの荷物室に収容できる。Fig.6にこの放熱器が展開した様子を示す。

3 我が国における液滴放熱器の実験研究(4),(5),(6)

電子技術総合研究所(電総研)では、液滴放熱器の基礎実験が均一液滴流の生成と液滴回収過程について行われた。

液滴流の生成では、できるだけ小さい液滴を多く生成することが重要で、またコレクターまでの途中で液滴同士の衝突のない均一流が必要である。

Fig.7は試作液滴エミッタの本体である。加圧された作動流体(拡散ポンプ油DC-704)がオリフィスより噴出し、同時に与えられるピエゾセラミック振

Table 2 低融点合金(1)

組成	混合比 [%]			融点 [K]
	錫	鉛	ビスマス	
単元素		100		600
	100		100	544 505
2 元素	62	38		456
	43	45	57 55	411 396
3 元素	15.5	52.5	32	369

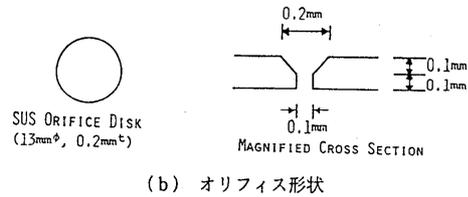
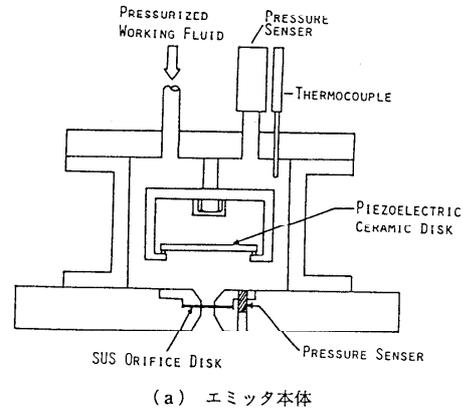


Fig.7 試作液滴エミッタ(4)

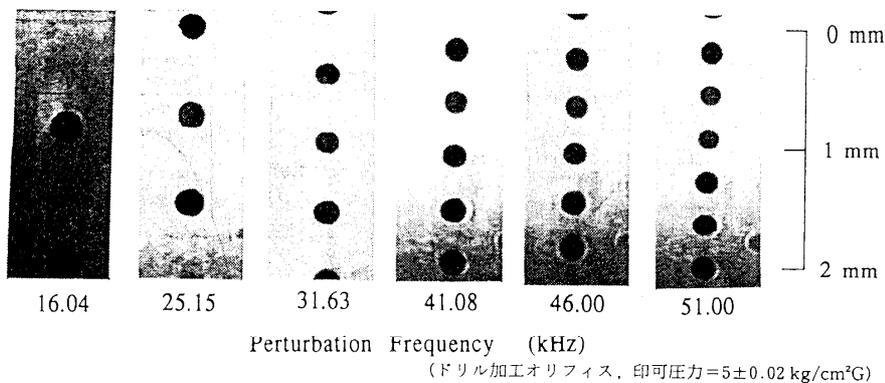


Fig.8 印可圧力擾乱周波数を変化させて得られた均一液滴流(4)

動子による圧力擾乱で噴流がちぎれて液滴となる。
 印可擾乱周波数 F が低い場合、大きさも間隔もランダムな液滴しか得られないが、 F を上げていくと主液滴間にできる微小液滴を伴った液滴流を經由して、Fig.8に示すような均一な液滴流が得られる。さらに F を上げると、再びランダムな液滴流となった。さらに、Fig.7(b)と同一の形状で、1m間隔で3行3列、計9個のオリフィスを開けた円盤による実験も試みられ、九つの均一な液滴流を得ている。

現在考えられているコレクターは、Fig.9に概念を、Table3にそれぞれの特徴を示したいづれも液膜表面に液滴を衝突させる方式であり、飛散することなく完全に液膜に吸収されることが必須である。電総研では直線式液滴コレクターのためにFig.10に示す液膜流生成器を製作し、試験を行なった。この結果、流速13~20m/s、液滴直径150~300 μ mの均一液滴流が、厚さ2mm以下、流速数十cm/s以下の液膜流と衝突角度35~65°で衝突した場合には、全く飛散液滴が観測されなかった (Fig.11 参照)。

これらの実験から、液滴放熱器方式は原理的な問題が無いことが示された。

おわりに

液滴冷却器は従来型のヒートパイプ付き放熱器に比べ質量を数十分の1にまで小さくすることができ、また将来の宇宙技術として見込みのあることが明らかにされたが、その実用化にはまだ多くの技術開発が必要である。その主要なものは、均一なオリフィスを膨大な数持つ液滴生成器の開発である。これにはインクジェットプリンタ技術の応用が有力と考えられている。また、高放射率物質の混入技術の確立も重要である。

開発された各要素を組み合わせた実験を次第にスケールアップして行い、最終的には宇宙空間での実証が必要であろう。

[参考文献]

- (1) A.T. Mattick and A. Hertzberg : Liquid Droplet Radiators for Heat Rejection in Space, J. of Energy, 15 (1981), 387-393.
- (2) A. White : Big Savings for Holes, Aerospace America (May 1989), 32-35.

Table 3 液滴コレクター方式の比較

	回転式液滴コレクター	直線式液滴コレクター
液滴シート形状 (放熱面積)	三角形 (~ $LT/2$)	長方形 (~ LT)
付加機構	回転機構	液膜作成用加圧機構
液回収	ビトー管	外部ポンプ
重量	小	大
大きさ	小	大

(注) L : 液滴エミッターの幅, T : 液滴エミッターとコレクターとの間隔

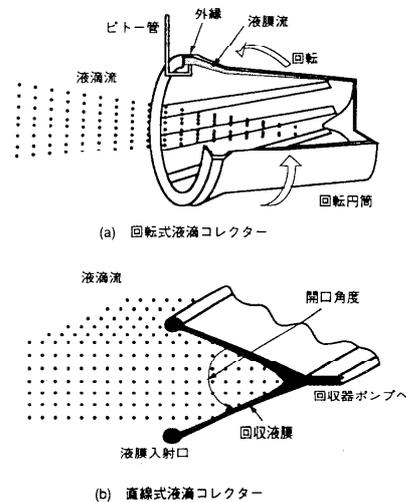


Fig.9 液滴コレクター概念図(5)

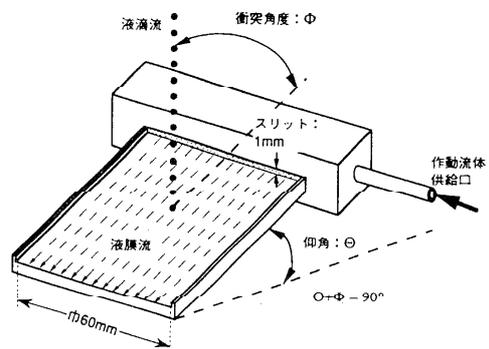


Fig.10 液膜流生成器(5)

- (3) K. Haga et al. : Overview of a Lunar Energy Park
 Concept Design, 20th Int. Sym. Space Technology
 and Science, Gifu (May 1996), Paper No. 96-i-15.
- (4) 細川, 川田, 岩崎, 工藤: 液滴ラジエータ用均一液
 滴流の生成、日本航空宇宙学会誌、39 (October
 1991) 551-557.
- (5) 細川ら: 液滴ラジエータにおける液滴回収過程の
 観察、同上、41 (June 1993) 385-390.
- (6) 細川ら: 液滴ラジエータの研究、電子技術総合研
 究所彙報、58 [5] (1991) 15-20.

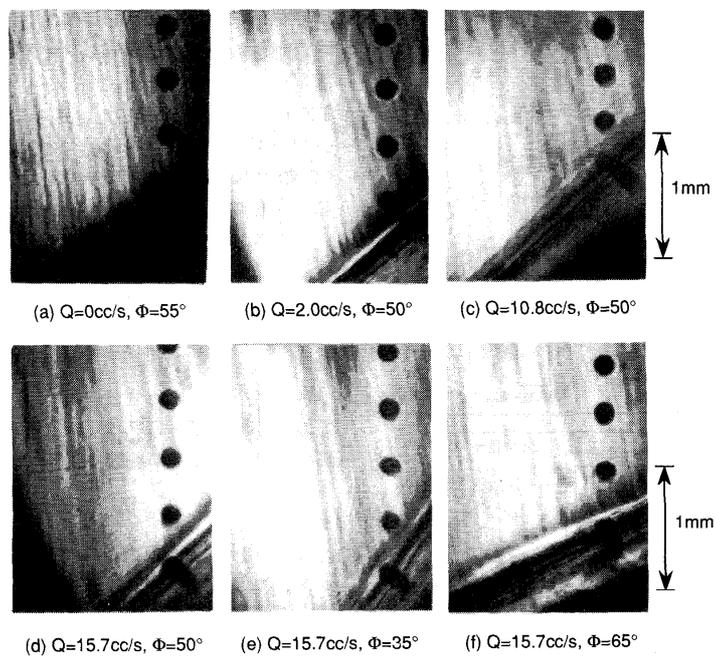


Fig. 11 均一液滴流の液膜との衝突(5)

月面ミッションのエネルギー供給と熱制御

Power Supply and Thermal Control for Lunar Mission

板垣 春昭 (宇宙開発事業団, 技術研究本部)
Haruaki ITAGAKI (Advanced Mission Research Center, NASDA)

1. はじめに

この夏NASAの火星探査機マーズパスファインダーの活躍が世界の注目をあびたが、月の起源や進化の解明等を目指した月探査計画も近年活発に議論されており、本年度は米国で製作された月探査衛星ルナプロスペクタが打ち上げられる予定である。このような月探査ならびにそれに続く月の開発、利用は単に新たな知見の獲得や宇宙科学の進歩に寄与するだけでなく、人間の活動領域の拡大、新たな資源やエネルギーの開発など人類共通の利益をもたらす可能性が高い。

しかしながら月探査とりわけ月面に探査機器などを降ろし、長期間にわたって運用しようとする月面ミッションの場合いくつかの技術課題が存在し、中でも夜間の電力確保はもっともクリティカルな課題の1つである。本書では、近い将来実施されると考えられる月面の無人ミッションを対象とした電力供給方式、技術について、電力問題と密接に関連する熱制御技術をからめて、将来の月探査、利用計画の展望とともに述べる。

2. 月探査計画

米国のアポロ計画による月面着陸から20数年をへて、今再び月のより詳細な探査が開始されつつある。

1994年米国(国防総省)のクレメンタイン衛星が月の南極域に電波を発射し、その反射データを解析した結果から極地の深いクレータ底部に氷が存在する可能性が高いとしてニュースになったのは最近のことである。今年(1999年)は米国(NASA)のルナプロスペクタ衛星、来年(以降)には我が国(ISAS:宇宙科学研究所)のルナAが打ち上げられる予定で、ルナプロスペクタは5種類の観測機器により月軌道上から月面の観測を行い、ルナAは3本のペネトレータを月面に打ち込んで月の内部構造を探る予定である。さらに2003

年には15種類ものミッション機器を搭載した我が国の大型月探査周回衛星(SELENE計画)がNASDA(宇宙開発事業団)/ISAS共同プロジェクトとして実現する予定である。この計画では月軌道上からの詳細観測に加えて、月面への軟着陸実験も予定されている(図1参照)。これら以外に、ヨーロッパにおいても月面着陸を含めた月探査計画が検討されている。

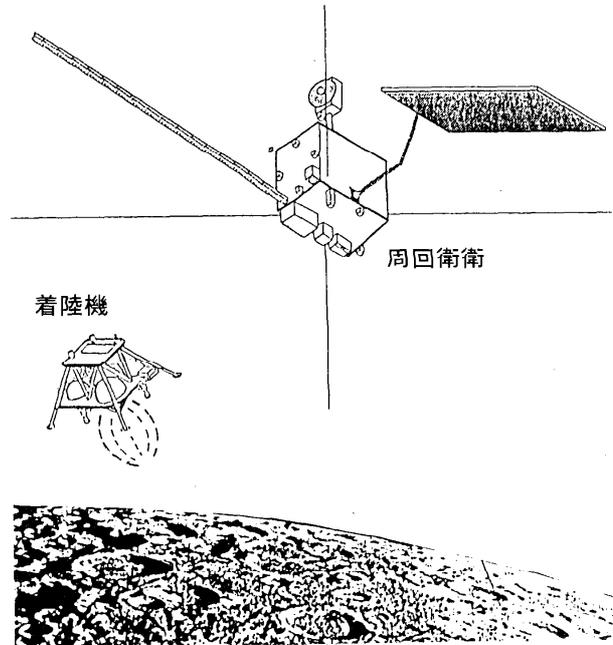


図1 月探査周回衛星(SELENE)計画

以上がここ数年間の月探査に関する計画であるが、これらの計画で主体となっている月軌道上からの観測が一段落すると、次のステップとして月面ローバやロボットによる月の直接探査や、月面の試料を地球に持ち帰るサンプルリターンミッションなどが行われるものと予測される。さらに探査だけでなく、月独特の環境(低雑音、口陰時の低温、大気がなく、遅い自転、地面の存在等)を利用した月面からの天文観測や宇宙環境

モニタが行われる可能性も高い。これらはまず無人ミッションとして実行されるであろうが、探査データの蓄積や月利用の可能性が高まるにつれて、いずれ月面有人拠点（図2）の建設が開始されるものと考えられる。最初は少人数のクルー（3名程度）が、短期間（昼間のみ10日間程度）滞在し、資源利用実験やライフサイエンス実験などを行うことになるだろうが、やがてより多くのクルーが長期間連続して滞在可能な恒久的な月面基地へと発展し、レゴリスからの酸素の抽出や建設材料の製造、ヘリウム3の採取など大規模な実験や、本格的な月面天文台の建設等が行われるものと予想される。

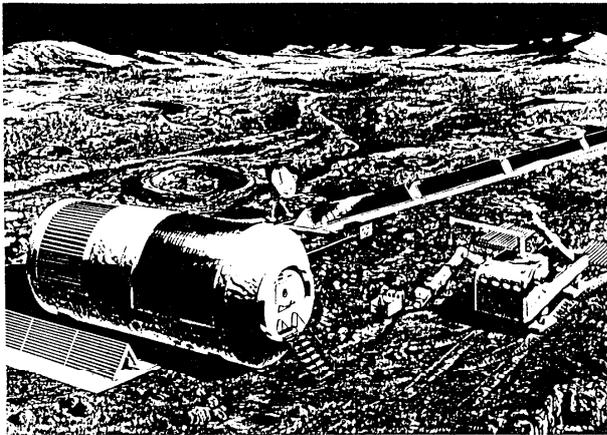


図2 月面有人拠点想像図

3. 月面ミッションに必要な技術

さまざまな月面ミッションを遂行しようとする、以下のような技術が必要になると考えられる。

- ・月面離着陸を含む地球～月間の輸送技術
- ・月面自動設置、遠隔操作技術
- ・月面上における移動、輸送技術
- ・月の裏側との交信を含む通信技術
- ・熱制御、電力供給、有人サポート技術、放射線防護などの月面滞在技術
- ・ロボット活用を含む有人拠点構築技術
- ・各種実験や天文台ミッション等の支援技術

これらの中で地球～月間の輸送システムは最も重要なインフラ技術の1つであるが、当面の無人ミッションに対してはH-IIAロケットで対応できる。有人段階ではさらに大規模な再使用型輸送機が必要となるであろう。月面上の移動技術については月面ローバ等の研究開発を積極的に進める必要がある。遠隔操作や通信技術は我が国が得意と

する分野の1つで、現在の技術の展開、応用で対処可能と考えられる。有人サポート技術については宇宙ステーションで得られた知識や経験を反映しつつ、さらに研究開発が必要である。有人拠点は月面での構築に工夫を要するが、構造体としては宇宙ステーションで培った技術が適用できよう。いずれにしても有人段階はもう少し先のことで、今から研究開発を進めておけば技術的実現性は十分あると考えられる。

表1に有人段階までを視野に入れた、月面ミッションに必要な技術開発計画の一案を示す。

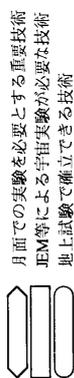
無人ミッション段階から月面に着陸するミッションにおいて考慮しなければならない月特有の条件として、月の昼夜が地球日にして各々約14日間続くことがあげられる。このため月面ミッションを遂行すべく月面に送り込まれた探査機等のシステム（以下月面システムという）は、昼間は厳しい高温（月の赤道付近で125℃）にさらされ、夜は低温状態（赤道域で-170℃）が長期間続き、このような温度環境に耐えるための熱制御が重要な課題となる。

さらに熱制御にも密接に関係するが、月面システムに対する夜間の電力供給は一層難しく、重要な技術課題である。人工衛星では通常、日照中は太陽電池、日陰になると蓄電池（2次電池）を使用するが、これを月面システムにそのまま採用すると、昼間は太陽電池が使用できるが、夜間用として月面まで輸送しなければならない蓄電池が非常に重く、大きな問題となる。これは宇宙開発の共通の問題であるが、ペイロードの重量がロケットの打ち上げ能力から厳しい制約をうけるため、ペイロードを地球軌道より遠い月軌道へ、さらに月面にまで到達させようとする、重量制限は一層厳しくなる。ちなみに月着陸機に、ある重量の機器を搭載させ、月軌道から月面に降ろそうすると、その機器とほぼ同じ重量の推進薬が着陸機に必要となる。

それでも夜間の使用電力が微々たるものであれば蓄電池の可能性もあるが、必要電力が大きくなると蓄電池は搭載が難しくなる。たとえば夜間連続100Wを使用するための蓄電池重量はLiイオン電池で400Kg以上となり、H-IIAによる無人の月ミッションを想定した場合ペイロード重量（800Kg程度）の半分以上を占めることになる。200Wであれば もはやミッションは成立しない。

表1 月インフラ技術開発計画(案)

主要ミッション	クリティカルな要素技術	技術開発フロー (▲ 打ち上げ; 同時期は相乗りを想定)				備考
		2000	2005	2010	2015	
月周回/着陸衛星	月周回軌道投入技術 衛星システム/遠隔制御技術 月面軟着陸技術				2030 (将来システム)	1号機は月周回観測衛星、2号機は月ベネトレターミナクションを想定 軟着陸、月面環境技術確立
	月面ローバ	走行技術 操縦・制御技術 移動体熱制御技術				観測機器だけでなく分析装置も搭載する 平坦地走行だけでなく、かけをよじ登ったり、降りる機能(係ロボッ、使用等)が必要
	月サンプリング	試料収集技術 地球帰還技術				ローバが採り出した試料を回収する可能性あり ダイレクトリターカLEOで回収
月面天文台 パイロット	天文台無人設置技術 遠隔操作技術 夜間の電力供給技術				小口径望遠鏡で予備実験 必要電力100W、本間は機械式冷却機使用、防振対策要、背景放射はミリ波帯観測	
月からのモニタリング	天文台とほぼ同じ システム構築手順 月環境データの把握 環境制御・生命維持技術 宇宙服				小口径望遠鏡で予備実験、最終的に口径1mのツイン望遠鏡要 放射線、地球磁気圏及び電波の観測で、現状の技術で実現可能 月環境は無人ミニミッションで取得したデータが利用可能 最小限の機材の輸送と車輪かつ短時間の有人作業によるシステムの構築	
有人サポート	液体燃料電池 太陽電池パネル設置技術				宇宙服の汚染防止、塵除去方法	
エネルギー	放射線耐可変型ラジエータ 三相流体ループ				月面における大型の太陽電池パネル設置方法 初期のエネルギー確保、非常用2次電池の重量大	
熱制御	月の重なりとの交信手段				機材の月面到着から観測開始までの冷却期間の熱保護方法	
通信	電力供給技術 モジュール化技術 シールド、耐熱技術				高速・大容量通信、月周回観測衛星の成長を反映 無人のローバミニミッションの成果を反映 クレーン/運搬/月面車のロボット機能が必要 ロボット自身にある程度の重量が必要 (レゴリスをカウンタウエイトとして利用)	
ロボット	O ₂ /H ₂ 回収プロセス 加熱用太陽炉				当面機軸設置実験が主体となる	
資源加工実験	放射線遮蔽の把握 生物試料輸送技術				低重力環境下における人間科学と宇宙放射線の生体への影響がメインテーマ 月からのモニタリングの成果を活用	
ライフS実験	軌道調整作業 ロボット再利用技術				2015年以降、可能な限り早い時間に再使用型月輸送システムを開発、迎川開始する	
輸送	燃料移送、長期保管 離着陸実験					



これがさらに有人活動時期になると、消費電力は飛躍的に増大するものと考えられ、これを蓄電池でまかなうことは非現実的である。このため月面ミッションにおいては蓄電池にかわるより軽量、高効率の電力供給方法が求められている。

4. 熱制御方式

月の熱環境を地球のそれと比較して表2（比較を容易にするため、どちらも低高度の軌道上の値を用いた）に示す。

表2 月の熱環境

熱入力	月	地球	備考
太陽光	1368	1368	W/m ²
アルビド	0.07	0.3	平均値
赤外放射	5~1268	234	W/m ²

月のアルビド係数は小さいが、赤外放射は非常に大きく、かつ太陽光の入射角により大幅に変化する。これらを月面上の温度環境としてみると、場所（緯度、経度、海、クレータ内など）により大きな違いがあるが、昼間の赤道域がもっとも高温となり、反対に極地方のクレータ内の日陰部分などにおいては-230℃以下という極端な低温になっているものと予測される。図3に赤道を例とした月面における1ヶ月間の温度変化を示す。

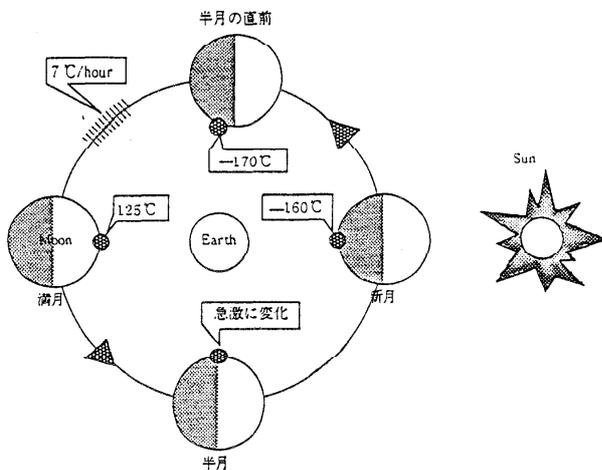


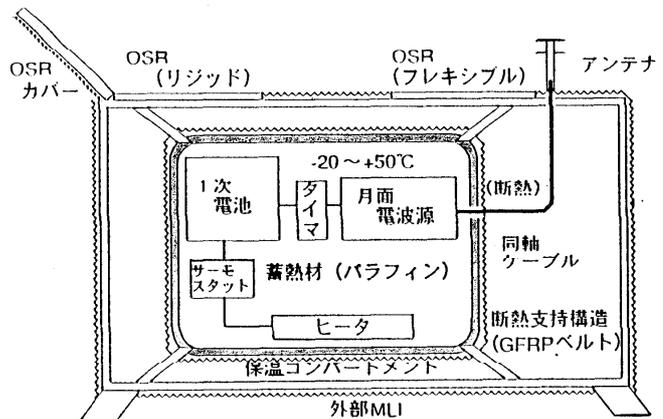
図3 月面における1ヶ月の温度変化

このような熱環境にさらされる月面ミッションで用いられる熱制御について、前述のSELEN E計画で予定されている月面着陸実験機を例として以下に述べる。

この実験機は月の表側、中央部赤道付近に着陸す

る予定であるが、実験機にはペイロードとして月の運動や秤動を観測するためのVLBI（超長基線干渉）実験を行う電波発信機（以下月面電波源という）が搭載されており、この電波源は月の昼夜を通して作動させなければならず、図4に示すような熱制御が施されている。

すなわち、電波源を電池やタイマ等の電波源を作動させるのに必要なすべての機器と一緒に保温コンパートメントと呼んでいる容器に納め、この容器を可能な限り外界と熱遮断するため周囲を断熱材でくるみ、さらに直接着陸機のパネルに取り付けず、低熱伝導率のGFRP製のベルトでいわば宙吊り状態で取り付けている。アンテナ用同軸ケーブルなど、どうしてもやむをえない外部との接続部分は、可能な限り熱伝導率の小さな材料を使用し、外面には断熱材をまきつけている。



（外側の箱は着陸機本体、保温コンパートメントは誇張して大きく描かれている）

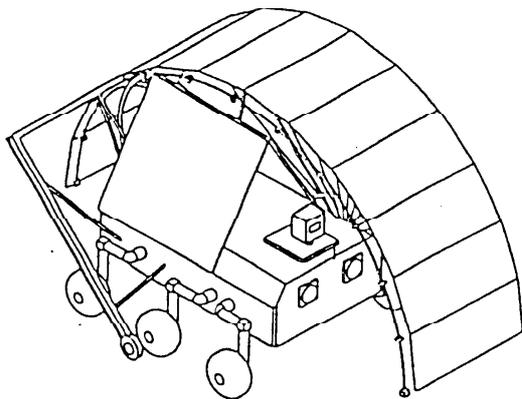
図4 着陸機搭載ペイロードの熱制御

こうすることにより月面の昼の高温環境からの熱の流入を避け、夜は自分自身からの熱の逃げをおさえている。夜間温度が規定値以下となった場合のみヒータをONする。このような熱制御は電波源の消費電力が非常に小さい（平均2W未満）ため可能となったが、これが大きい場合は内部の発熱を逃がすよう容器に放熱面をもうけなければならず、そうすると夜間この放熱面からの熱の逃げが大きくなるためさらにヒータ電力が必要となり、夜間の電力供給の問題と相まって一層熱制御が難しくなるものと考えられる。

以上のような熱制御における難しさは主として月面の昼夜が14日間にわたることに起因しているが、上記のような熱制御方式は基本的には衛星

などの宇宙機で採用しているものと同等である。しかしながら月面におけるもう1つの独特の条件として、レゴリスの存在があげられる。月面を覆う砂（レゴリス）は熱伝導率が極端に小さく（ 0.01 W/m/K 程度）、きわめてすぐれた断熱材といえる。このため月表面下 50 cm 以上の深さでは昼夜にかかわらず温度はほとんど一定（約 -20°C ）である。ルナAで計画されているペネトレータは、この温度環境を積極的に利用して熱制御しているともいえる。従って将来月面システムに”もぐら”のような穴掘り機能を持たせることができれば、夜間はレゴリスの中ですごすということもありうるかもしれない。

そこまでは無理だとしても、月面システム自身を地表面を含めて、傘のように開閉できる断熱材で覆うことができれば夜間の熱制御はかなり容易になる。地表面すなわちレゴリスがまだ温かいうちに図5のように月面システム（この図では月面ローバを想定）を保温パラソルと名づけた断熱ブランケットで覆うと、夜間パラソル内のレゴリス表面からの放射による熱の逃げがおさえられ（地中方向への逃げは低熱伝導率のためもともと小さい）、温度があまり低下しない。もしパラソルと地面とのすきまをほぼなくすることができれば、解析上パラソル内の温度は -50°C 程度までしか降下しない。このようなパラソルシステムは開閉時にわずかな電力を消費するが、それ以外はいっさい電力を必要とせず、また比較的軽量、構造も簡単であるため月面での熱制御手段として将来採用されるかもしれない。



(ハビカーのフトタイアの構造で、内部が見えるようパラソルの半分は描いてない)

図5 月面用保温パラソル

5. 電力供給方式

他の宇宙ミッション同様、月面におけるミッションについても電力供給は不可欠で、供給の程度によりミッションの達成度が大きく左右される。しかしながら現時点では、月面に長期間滞在するときの夜間の電力供給に対して確固とした見通しが得られていない。

夜間は月面システムの活動を停止し電力消費を最小限におさえ、いわば冬眠状態にすることが1つの対策として考えられるが、長期間の連続運用が求められる場合や、天文台のようにむしろ夜間の運用が必要とされるミッションではこのような対応も困難である。

そのため従来の2次電池にかわる電力供給方法として、再生型燃料電池、原子力電池（RTG）、フライホイール、マイクロ波やレーザーによるエネルギー伝送などが考えられるが、現在のところ燃料電池とRTG以外は宇宙用として実績がない。ただしRTGは打ち上げ時のリスク等を考えると必ずしも好ましいものでない。燃料電池はシャトル等で実績はあるものの、無人で長期間作動させようとするときまだ技術課題がある。

このような状況をふまえ、以下に再生型燃料電池、フライホイール、レーザーによるエネルギー伝送の3つを取り上げ、月面ミッションの電力供給源としての技術的成立性を述べる。なお、いずれの検討も昼間は太陽電池により必要な電力が確保されていることを前提とした。

(1)再生型燃料電池

夜間燃料電池により発電し、昼間は発電を停止して太陽電池からの電力を用いて、夜間に燃料電池で生成された水を電気分解し、得られた酸素ガス、水素ガスを昇圧してタンクに貯蔵する。

このような閉ループで、酸素と水素を循環させて発電/エネルギー貯蔵を行う再生型燃料電池システムにより、月面の夜間 100 W を発電させようとするとき、システム規模は重量で 320 Kg （水の電気分解用電源としての太陽電池パネル 76 Kg を含む）程度となり、2次電池と単純比較すると重量的には有利である。（図6参照）

寸度的にもH-IIAのフェアリング内に納めることができる。図7にこのようなシステムの構成を昼夜のサイクルにあわせて示す。

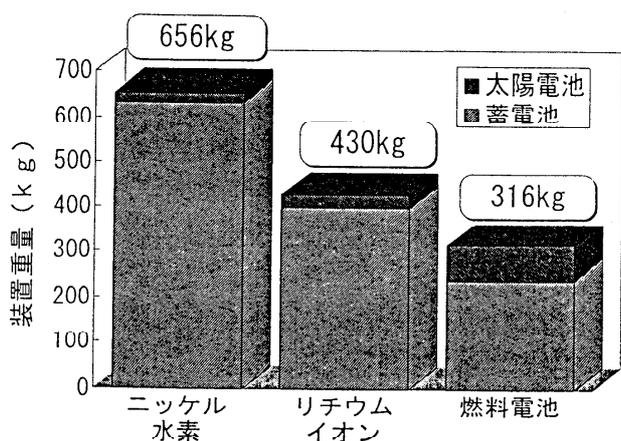
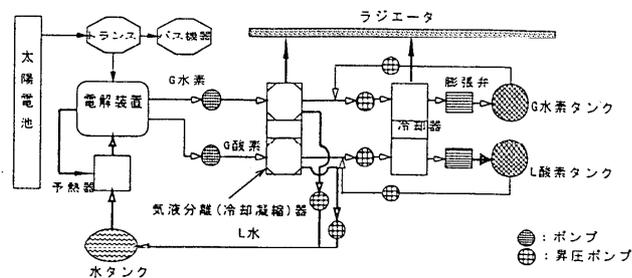


図6 2次電池と燃料電池の重量比較

ただしこのシステムは機械的可動部を持ち、電極の消耗、リーク対策等を考慮しなければならず、さらに2次電池と異なり1カ所の作動不良で全体の発電能力が失われる可能性があり、月面上で長期間の自動運転を可能とするためには、これらの課題を解決しなければならない。ちなみにスペースシャトルで使用されているアルカリ型燃料電池の寿命は3~4ヶ月といわれ、これを延長させるためには固体有機電解質型への変換などをはかる必要があると考えられる。



(1) 昼 (太陽電池パネルでの発電時) のサイクル

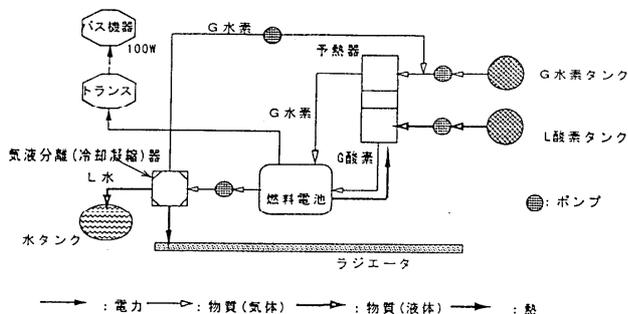


図7 燃料電池システムの昼夜のサイクル

なお本燃料電池システムの中でもっとも重量、寸法が大きいものはタンクであり、もし貯蔵ガスを液化することができれば、タンク重量を大きく軽減することが可能となり、将来的には大電力要求に対して有利となる可能性がある。

(2) フライホイール

フライホイールは、地上ではすでに無停電電源や余剰電力の平滑化装置として実績があるが、これを月面で使おうとする場合、昼間太陽電池で円板または円筒を回転させて、電力を力学的エネルギーの形で貯蔵し、夜間この回転エネルギーにより発電機を回して電力を取り出すことになる。

フライホイールの基本的構造は単純で、ロータ、軸受け、電動/発電機から構成され、高回転数を確保するためにはロータに比強度の大きい材料を用いる必要がある。現在のところCFRPがもっとも適しているようである。

夜間の使用電力を20Wとして計算してみると、ロータはCFRP製、半径30~40cm、回転数30000~40000rpm、ロータ重量で60Kg (全体で100Kg)程度となる。ただし、軸受けロスを考えると14日間連続して電力を取り出すことはなかなか難しく、現在のところ10日間程度が限度のようである。なお、軸受けは高速運転に耐えられるようピボット軸受けや磁気軸受けを用いるが、磁気軸受けの場合非接触のため高速回転、長寿命の点で好ましいが、軸受け制御のために余分な電力が必要になる。

上記のフライホイール1台で14日間連続して放電を可能とするためには、回転数をあげるか、ロータ重量を大きくするしかないが、回転数はほぼ上限で、これ以上の高速回転は難しい。ロータを大きくする場合、径方向に広げると強度の点から無理があり、軸方向にのばすしかないが、いずれにしてもロータ重量の増大に伴ってシステム全体重量が250Kg程度となり、重量的なメリットはほとんどなくなる。

しかしながらフライホイールは充放電を短時間で行えるという特徴があり、規模にもよるが短時間で大電力の放電が可能で、高速回転体(スピン安定)という2次的特徴を含めて、これらを活かした利用の可能性がありそうである。

(3) レーザによるエネルギー伝送

図8に概念を示すように、月面システムに対し、月周回軌道上にある衛星からレーザを発射し、これを月面システム側が受光アンテナで受けて電力に変換することにより、夜間の電力確保が可能となる。

レーザのかわりにマイクロ波を使っても同様のことが可能であるが、レーザの波長はマイクロ波よりはるかに小さいためアンテナ径を小さくできることから、今回はレーザを選択した。

ただし1個の衛星では月面システムと常時リンクすることは不可能なため、軌道上に複数個のレーザ送信衛星を配置するか、月面システム側に2次電池を持たせ、リンクがとれない期間は2次電池から電力を供給する。現時点では後者のほうが安価で現実的であろう。

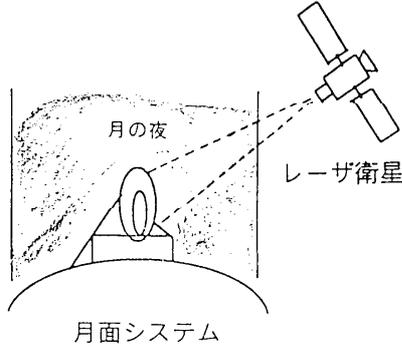


図8 レーザによるエネルギー伝送

ちなみに北緯80°に置かれた月面システムに対し、高度2000Km(周期340分)、軌道傾斜角80°の衛星からNd:YAGレーザを発射し、月面システム側はレーザビームの広がりや衛星の姿勢制御精度及び月面におけるアンテナ展開を考慮して直径10mの固定型アンテナ(Si太陽電池パネルを使用)で受光するものとする。このときの月面システムと衛星との位置関係を図9に示した。衛星が月面システムから可視域にいる時間は約2時間で、この間月面のアンテナは衛星からレーザ照射を受け発電が可能となる。したがってこの2時間中にアンテナからの発電を月面システムに供給し、さらに2次電池を充電し、レーザ照射がとだえる残りの時間(不可視時間)は2次電池を放電させて電力を得る。このような方式で月面システムに夜間100Wを供給するための衛星からのレーザ出力は、伝送ロス、受光側のレーザビームの捕捉率、受光アンテナの太陽電池効率、2次電池の充放電効率等を考慮すると1.4KW程度となる。このときの衛星からの送信ビーム径は0.37mである。このような出力のレーザ送信機の重量は、送信光学系にハニカム構造を採用して軽量化を計っても現状では850Kgと推定され、これを搭載した月周回衛星の規模はH-IIA1回の打ち上げで実現できるかどうかの境界線上にあると考えられる。

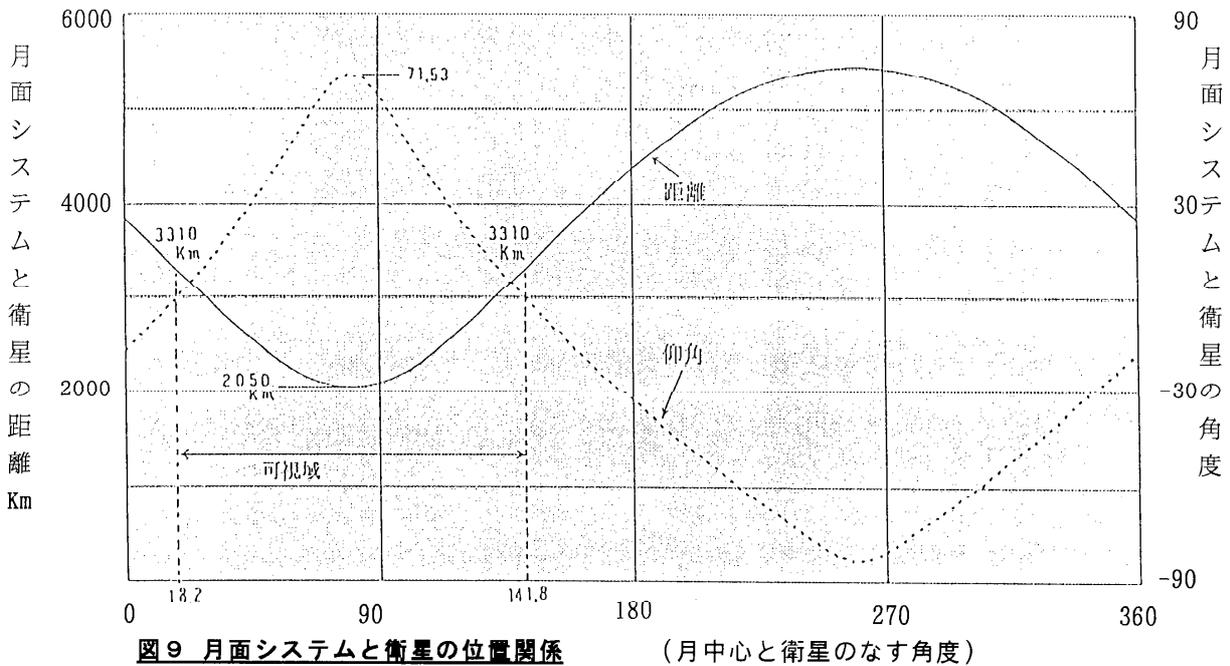


図9 月面システムと衛星の位置関係 (月中心と衛星のなす角度)

一方月面側は2次電池重量が20Kg、受光アンテナは90Kgで、合計110Kg程度で済む。このようにレーザによる電力供給方式は月軌道上にレーザ送信衛星が必要となるが、月面上に降ろさなければならない電力関連機器が軽量で、しかも月面システムが移動したり、複数個であっても給電できる可能性を持ち、融通性にとんでいる。現状では衛星の必要電力や重量、月面のアンテナ寸法が大きい、レーザ発信器の効率向上、小型化による衛星の小型軽量化、衛星のポインティング精度の向上あるいは追尾装置の付加による月面側アンテナの小型軽量化等の可能性があるものと考えられる。

以上、月面において夜間に電力を確保する方法として3つの方式を検討したが、これらはいずれも比較的近い将来の無人ミッションを想定したもので、必用電力も100W程度を目安とした。しかしながら、ミッションの大規模化に伴い必要電力は増大すると予想され、有人段階、とくに恒久的な月面基地が建設されるような時代においては、電力は月面の資源を利用した発電により確保される可能性が高くなる。

たとえば月のレゴリスを、太陽光を集光して溶融、凝固させ、ガラス状のブロックを形成して、これを地中に埋める。昼間ふんだんにある太陽熱を複合懸垂面集光器などを利用して集め、このブロックを1000℃近辺まで加熱すると、ブロックは周りを低熱伝導性のレゴリスで覆われているため、夜になっても温度があまり低くならず高温に保たれる。すなわち蓄熱材として使用できるわけである。一方、夜間の月表面温度は非常に低いから、蓄熱材との温度差を利用して熱電発電を行えば夜間の電力確保が可能である。この方式では、若干効率は落ちるが昼間でも発電可能である。

たとえば100KWを昼夜を通して常時発電しようとする、必要となるレゴリスブロックの量は5000m³をこえ、そのために設置しなければならない集光器(フィルム鏡を使うと軽量化が可能)群も非常に数が多くなる。発電素子としては、たとえばFeSi系熱電素子を使うならば、レゴリスから製作できる可能性がある。

このような発電施設を月資源を利用して数多く建設すれば、将来軌道上の宇宙システムさらには地球にまで電力供給が可能となるかもしれない。

6. むすび

月探査を目的に月面に送り込まれたシステムの熱制御と、ミッション遂行に不可欠な月面の夜間における電力供給について論じた。

月面システムは、人工衛星が遭遇する軌道上の熱環境に劣らず過酷な熱環境にさらされるため、夜間のヒータ電力を十分に確保できるような場合を除いて(実際にはありそうにもないが)、衛星の場合以上に効率的な熱制御が求められる。

一方、熱制御以上に深刻な問題として夜間における電力供給があり、本文では3種類の方式を検討したが、現時点ではこれらが2次電池に比べて決定的に有利であるとはいえない。

しかしながらこれらの検討は、月面での技術的成立性の確認を目的とした概念的なもので、間近に迫りつつある本格的な月探査時代の幕開けに備えて、2次電池自体の高効率化、軽量化も視野にいれながら、より具体的な研究開発を開始する時期に来ているものとする。

参考文献

- (1)板垣、宇田川 月面システムのエネルギー供給方式 機械学会、熱工学シンポジウム講演論文集(1997、7)
- (2)月探査に関する調査研究報告書 未来工学研究所編(H7、3)
- (3)岡、板垣他 月面エネルギーシステム(再生型燃料電池)40回宇宙科学技術連合講演会講演集(H8、10)
- (4)宇田川、遠藤他 月面エネルギーシステム(小電力レーザ伝送)16回宇宙エネルギーシンポジウム講演集(1997、2)
- (5)和田、中島他 フライホイールを用いた月面でのエネルギー確保 15回宇宙エネルギーシンポジウム講演集(1996、2)
- (6)和田、江口他 パラソルを用いた月面での小型保温システム 15回宇宙エネルギーシンポジウム講演集(1996、2)
- (7)R.Nagasima et al Glass Ocean, 2nd Wireless Power Conference(1995、10)
- (8)疋田、板垣他 月面着陸実験機の概念検討 平成8年度宇宙輸送シンポジウム講演集(1997、1)
- (9)G.H.Heiken, et al Lunar Source Book Cambridge University Press(1991)

「研究ノートから：－伝熱問題に関する
未成功研究－」の編集にあたって

Preface to "From Research Notes"

---Still Unsucceeded Research on Heat Transfer Subjects---

研究ノート

第36期編集委員会

小澤 由行 (高砂熱学工業 (株)、総合研究所)

Yoshiyuki KOZAWA (R & D Center, Takasago Thermal
Engineering Co. Ltd.)

1. お礼

まずはこの編集を実施するにあたり、50名を越える各界各層の会員の方々にご意見を伺いました。

その多くの方々は、この編集の趣旨を真摯に受けとめて下さり、即座に貴重なまた本音のご意見をお寄せ下さり、編集を担当させて戴いた者として心から感謝の気持ちを申し上げます。さらに、長年に渡り数多くの素晴らしい研究成果を教授下さいました7人の先生方には、ご英断の下に今回のご執筆を頂き、出版にまで至らしめて下さり、ここに改めて衷心より御礼申し上げます。

伝熱研究会の発足当時から伝承されているこのような本物の連帯感あるいはフランクな雰囲気は、ご承知のとおり掛け替えの無い伝熱学会の財産であります。この編集が伝熱研究会・学会のよき伝統の今後の一層の発展と深化の一助になれば、担当させて戴いた者として望外の喜びであります。

2. 成功と失敗

研究の推進あるいは技術の開発は、人間の知的欲求の発露であります。その中では常に創造性の発揮が求められます。ここで、創造性とは一般に新規性と成功度で計られます。また新規性に比べて、成功度とは、程度の問題であり、正確にあるいは普遍性をもって計ることは難しいとされます。さらに、対象が自然科学の課題であっても、研究や技術の世界では、人が多くは人のために為すことであり、途中には失敗があろうとも結果を成功に導くためには、強固な忍耐力あるいは人間社会の動きとの相関を忘れる訳にはいきません。

言葉の上では、成功と失敗は反対語です。また成功には、「目的を達すること」を越えて、その結果得られる「富」や「功績」までも含まれます。一方失

敗には、単に「し損なうこと」を越えて、その結果もたらされる「害」までも含まれます。そこで、言葉から醸し出される気分としては、研究や技術の分野では「失敗は禁句」に等しいこととなります。また「必要は発明の母！」とか「失敗は成功の素！」といった格言の類に依拠しますと、世の中にニーズがあるから研究や技術に係わる活動を始め、「失敗を恐れず」に忍耐強く進めれば必ずや成功するといったように、その活動自身はア・プリオリに自己正当化できましよう。

しかし、科学技術が世の中に深く、かつ広く浸透した昨今では、言うまでもなくニーズあるいは価値観は多種・多様化していますし、時や場所、はたまた人と共に変化も大きなものがあり得ます。また、科学技術がカバーする範囲、あるいは失敗したとは言えないまでも予期せぬ人為的な事象による波及あるいは極端な場合の「害」が、計り知れない程度になることも希ではありません。さらに、その研究開発・技術開発に要する時間と労力や資金が、多大となる場合も少なくありません。このように考えると、「失敗が許されない」、あるいは成功しても「時、既に遅し」といったことも十分想定されます。

伝熱学会の会員は今や1200人を越え、毎年のシンポジウムでは、1000人に近い参加者と400件を越える成功裡の研究成果の発表が為され、さらにその懇親会には300名を越える方々のご出席があるとの数字があります。「早いこと、大きいこと、多いことは、良いことだ！」といえ、誠に同慶の至りです。さらに、学会誌「伝熱研究」では、毎年4号が出版され、「特集」、「トピックス」、「レビュー」などの記事は総計で40件を越えています。その意味ではニーズやシーズは腐るほどあり、方法としての理論・実験・数値解析といったものも潤沢に整備されており、伝熱学会の雰囲気も極めてアット・ホームであるので、後は研究者・技術者がかっと・もっと忙しく新しい課題に挑戦し、あるいは

は挑戦できる筈であるし、さらには産官学の各界の研究や技術の協調が円滑に図れば、「伝熱学会の将来は薔薇色である」との分析が成り立ちましよう。

研究推進や技術開発において、「成功体験」は掛け替えのない喜びであります。伝熱学会に関する前述の数値から、ほとんどの会員の皆様はその体験を既に十分得られていると拝察されます。しかし、その研究成果、伝熱に係わるニーズやシーズ、あるいは研究方法の適合性について、何か蟻りを感じておられる研究者・技術者がおいでになることも確かなことといえましよう。この原因として、第1に「伝熱」という研究・技術分野の学理としての深さにおける、あるいは製品開発の中の重みにおける一種の限界が挙げられましよう。次に「伝熱に係わるニーズやシーズ」に関する個々の研究者・技術者の分析の妥当性への疑問がありましよう。また昨今の「伝熱研究の中での『実験』の煩雑さ・困難さ、あるいは軽視(?)」もありましよう。さらには最近の研究開発にも「戦略」なる言葉がもてはやされていますが、換言すれば伝熱研究推進や伝熱技術開発における「論理性」の欠如もあり得ましよう。

これらの原因を取り除くために、「とにかく」、あるいは「しかしか」の『成功を納めた』という成果の積み重ねを旨とする従来方式あるいは横並び方式の学会活動の重要性は、否定されるものではありません。しかし、冒頭に述べました『成功度』という観点に立てば、“100%”成功ということは希有でありましよう。そこで、成功の一部である『過程には、失敗があった』、さらには成功の対極にある『結果は、失敗した』ということを取って論述することは、『成功度を計る』上では不可欠なことと言えましよう。また、伝熱に係わる研究や技術で、「何ができる」を越えて、「何をすべきである」かを特定する上でも役立ちましよう。さらに研究開発の推進における論理的な不備や矛盾を具体的にチェックする上でも有効な手だてにもなりましよう。

以上のような考え方から、当初は「伝熱研究における失敗談」を編集することを計画しました。この計画の趣旨には多くの方々の賛同がありましたが、この『失敗』という言葉が持つマイナスのイメージが強く、ご執筆にはかなりの抵抗がございましよう。これは編集出版委員長である岐阜大学の熊田先生か

ら、かねがねご指摘戴いていたことでありましよう。

思案を巡らしておりましようところ、一色先生から「失敗を止めて、『未成功』にしたら良い」とのご意見を賜り、早速標題に使わせて戴きました。ところで広辞苑によれば、「失敗」と「不成功」は同意語であります。また「未成」は「まだできあがっていないこと」と定義されていましよう、成功や失敗の意味の中にも含まれる結果の功罪までは含まれていましよう。「未成功」という言葉は、広辞苑にはありません。従いましよう、造語「未成功」の厳密な定義は読者にお任せすることにしましよう、ここでは、この編集の趣旨をお汲み取り戴ければ幸いです。

3. 失敗の情報公開

研究者や技術者の間では、古くから「情報交換」の重要性は認識されてきた。学会活動においても、情報交換は大切な任務の一つであります。昨今の学会活動では、専門家同士の「情報交換」を越えて、世間にかかれた学会活動という趣旨から、いわゆる「情報公開」の必要性が認識されていましよう。これは、研究者が特定の階層の限られた人達でなくなってきたり、社会のニーズや要望に無関心では居られなくなってきたことにも依るのでありましよう。一方、社会性がさらに強い技術者にとっては、自己のより幅広い切磋琢磨や開発技術の理解あるいは宣伝効果の獲得という側面が情報公開には含まれましよう。

研究成果や技術開発の成果を受け取る側の立場に立てば、その成果の波及が直接的で、かつ広い分野では、科学技術と言えどもその研究情報の公開は、重要視されます。例えば、原子力の平和利用においては、3原則の一つに「公開」が元々位置付けられていましよう。最近では、さらに「情報公開＝透明性の確保」ということまで問題視されていましよう。

以上のような背景から、一般に情報公開では「公開＝成功」という考え方が強くなりますし、現在までにはこのような枠組みの中での公開の方法が用意されていましよう。すなわち、学会活動の中では、講演会や論文発表、展望・総説・レビューといった解説記事や特集記事、公開セミナー、公開シンポジウムなどがそれで、さらにその具体的なフォーマットについても既に定形化されていましよう。

人間社会の中で、物事を失敗と言わない、あるいは言いたくない分野として、政治、官僚、研究、教育などが挙げられます。これらでは、結果責任と言いながら、意志決定の方法など「元々責任の所在が不明」であったり、「歴史が証明する問題」であったり、「時間がかかり、因果関係が曖昧」であったりする場合が多いのが特徴であります。しかし最近の政治や官僚の世界では、「失敗の情報公開」、すなわち「謝罪」もつまびらかにされてきています。

研究においては、失敗＝害という短絡的な関係は元々あり得ません。むしろ失敗をしないように・しないように研究を進めることは、研究内容を狭くしたり、自己満足であったり、時には大きな落とし穴に陥ることさえ有り得ると言われます。「失敗は成功の素」との格言の如く、失敗が成功に導く「糧」であることは研究者の間では広く認識されています。すなわち、研究者にとっては、失敗の情報公開は一向に差し支えないばかりか、有益でありましょう。

しかしここで問題なことは、「失敗の情報公開」を行う方法が未だ定形化されていないことであります。もう一つの問題は、特に科学技術の世界では、何事も客観性が大事なことであります。例えば研究論文等では、擬人法や受身形の表現が善とされ、引用文献の紹介を除けば、特に「誰が」ということを「陽」には通常書きません。しかし、失敗を論述する場合にはこのような手法が通用しません。すなわち、常に「第1人称＝誰が」が明確になります。

今回、大学や国研の研究者に失敗談の執筆について、その可能性を伺ったとき、問題提起された中にはこのような類の議論が多くありました。例えば、失敗は個人の問題である！ 研究者の能力が疑われる！ 随想・ぼやき・愚痴になる！ 研究に失敗はつきもので、いちいち整理していない！ 口述することはできるが、他者に役立つような書き物にはできない！ などでありました。しかしオーバーに申し上げれば、研究や技術に関する「失敗の情報公開」を積極的に、かつ誤解を生まずにむしろ有益な形で行う具体的な方法を案出することも、これからの研究者に課せられた大事な仕事ではないでしょうか？

企業の技術者にとって、「失敗の情報公開」にはさらに複雑な問題があります。わが国の企業では、ご

承知のとおりその技術者の組織への帰属意識が強く、またすぐに、個人の失敗→属する部署の失敗→企業の不名誉→企業活動の害→個人の・・・という図式になりがちです。次に、技術開発で得た成果は新技術・新商品となって世の中に受け入れられて始めて成功と言われます。その過程には多くの技術関連の部署から市場動向まで含まれ、ある目的・ニーズから発した技術開発を成功に導く努力も相当大変なものである反面、当初の目的・ニーズとは異なった技術展開も開発の内容、時間経過や市場動向に依ってはあり得ます。そこで、技術者個人として、一つの技術開発を軽々に失敗とは断言できないこととなります。さらに、失敗技術こそが、特許にもならない代わりに成功技術以上に、技術者・企業の貴重な、かつ独特なノウハウであり、結果的に公開できないこととなります。以上のことから、一般に企業の技術者にとっては、失敗技術の情報公開の方法が整備されていないというよりは、失敗技術の公開そのものが不可能に近いということであります。

失敗談の編集に対して、企業の技術者から寄せられたご意見は、このような背景からのものがほとんどでありました。しかし、第1線の技術者個人としては、学会活動の中でこのような企画を行うことの有意性を認められると共に、具体的な執筆内容としては、研究の反省、開発の筋道の中での一つの失敗、適用ニーズの変更といった視点を取り入れたら良いとの積極的な提案が多く寄せられました。

4. 研究・技術の自己評価

最近の研究や技術の「評価」ということがよく議論されています。これも情報公開と同じく「総論賛成、各論・・・」という場合が多いものです。世の中では、研究の意義や倫理について研究当事者にはもはや任せられないとの意見までもあります。また長期にわたり多くの資金を必要とする巨大科学では、投入資金の規模や社会の変革との関係から、中止を含めた計画の機動的な「見直し」に資するための評価が不可欠であると認識されるに及んでいます。その評価には事後あるいは中間評価に留まらずアセスメント、すなわち事前評価までも求められます。

評価は、判断とは異なり、基本的に客観性の高いことが大事になります。またその評価を然るべき判

断に連続的につなげるためには、数値化された評価が一般に求められます。しかし、基礎研究、応用研究、プロジェクト研究、実用開発研究、などと大きく研究開発の性格を分けても、それぞれの評価の因子や基準をどのように定めるのかがよく分からない場合が多くあります。さらに評価の方法となると、例えば第三者に依る評価といっても、簡単に第三者が定義できなかつたり、第三者の評価結果を当事者が納得できる場合が余りにも少ないとの批判があります。また各研究機関の自主的な評価に至っては、「仲間内のお手盛り評価である」との懸念を買う場合が多く見られます。すなわち、合理的な研究評価の方法は現状では無いに等しいと言えます。

しかし、とにかく評価を行うとなると、例えば発表論文の数とか、ある技術開発の成果から即座にくら儲かったかといった数値化できるものに依拠することになりがちです。例えば研究の質とか将来性、技術の蓄積とか強靱性、あるいは研究者・技術者の成長などといったことはほとんど考慮できず、いわゆる効率主義・拙速主義・流行主義という、どちらかという評価とは名ばかりで今までの研究・技術の在り方に近いものになってしまいます。もちろん、それらの弊害は既に広く認識されているにも拘わらずであります。

このような研究や技術の評価に係わる上述の問題点については、その早急で抜本的な解決は難しいと言わざるを得ません。そこで、研究や技術の成果は、究極的には自省を含めた人ひとりの推進に対する強い意志とリーダーシップの発露の賜であることから、成功から失敗に至る幅広い自己評価がまずもって必要なのではないでしょうか。自己評価ということには、研究や技術に対する謙虚さあるいは倫理観の発現も当然含まれることになりましょう。研究や技術に関する自己評価でこそ言える失敗をより多くの研究者や技術者の間で共有できることなく、普遍性のある成功度は計りようがないのではないのでしょうか。

一般に自己評価はあくまでも自身のことであり、他人に言うべきことでないとの考え方もあり得ます。伝熱研究会発足以来の真摯でアット・ホームな伝熱学会の雰囲気をもってすれば、失敗を含む自己評価を他者に知らせ、さらにその他者は失敗当事者に対して粗さがしや揚げ足取り的な見方でなく、そ

の自己評価を受け取った研究者・技術者自身の研究開発・技術開発活動の中にフィード・バックして生かすことができるのではないのでしょうか。このような積み重ねが無くして、有意で受容性高い研究・技術の評価因子の特定や基準の設定、さらにはその評価方法は生まれないと思われまます。

5. お願い

今回の「研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究」を編集するにあたり、第1に危惧しましたことは、法人組織で伝熱に関する学術を極める学会誌に馴染むものか否かということでした。学術活動である以上やはり失敗は無いという考え方、むしろ失敗を乗り越えて成功に至ったというのが本筋というものであります。しかし、ご意見を伺った多くの方々の賛同を戴いて編集を進めさせて戴きました。

ここに私が述べましたことは、一般論であり、研究者や技術者には常識かもしれません。しかし、このような趣旨の基に、今回は7人の先生方がご自身の「研究ノートから」工夫を凝らして寄稿下さいました。失敗の重要性もさることながら、研究や技術に賭ける執念の大きさと深さを十分にご理解戴けるものと確信します。ご執筆を強引にお願いした先生方には、数々の失礼の段を是非ともお赦し願います。

最後にここで、読者の方々に重ねて以下をお願いします。

この編集では、失敗を恐れない学会雰囲気作り、研究・技術の生きた伝承、学術研究と技術開発の橋渡し、若手研究者・技術者に分かりやすい学会作り、伝熱研究会の良き伝統の継承などの一助になることを期待しております。失敗の言葉の持つマイナスのイメージに捕らわれることなく、この編集に対する忌憚のないご意見、ご感想を編集委員まで是非お寄せ願います。また、できますれば次回以降も会員各位のご協力を戴いて、この編集が結果的に「失敗に終る」ことがないように念願してやみません。

サーモプレッサーの夢と失敗

Dream and Failure of Thermopressor

一色 尚次 (日本大学)

Naotsugu ISSIKI (Nihon University)

1. まえがき

主として伝熱工学者としての失敗談を語れ、というのがこの執筆への依頼であった。考えれば私の1944年、陸軍航空技研での航空発動機エアロック防止研究以来、実に53年にもなる研究所、大学等での研究歴で、失敗の方が成功よりも多く、思わず「ほぞを噛む」の思いである。敗戦とともに航空発動機そのものが消失し、1954年には、石炭粉とともにまっ黒になって改良研究をしていた当時最高級の連絡船の洞爺丸が海底に沈み、ついで研究と設計に尽力して重力とバーンアウトに関する一色推定式？によって原子炉圧力の設定をした原子力船「むつ」がその研究途上の放射線もれで挫折し、遂に推定式の実証には到らなかった。

また、一色式ラビリンスポンプも浮上せず、新着想の濃度差エネルギーエンジンも実験には大成功したがその応用はまだ時不到の思いである。

また、1975年以来20年以上も力をかたむけて来たスターリングエンジンも、その現世的成功には今一步であって、これもまさに21世紀の到来を待つばかりである。

しかし「失敗は成功のもと」の格言が示すように、これらの失敗(?)も必ず何か別の花を咲かせて来たことも事実である。例えば原子力船のボイラの研究の延長は斜めシュリーレン写真による沸騰気泡の伴流の存在を鮮やかに確定したし、また濃度差エネルギーの研究は、吸収伝熱における一色・小川式CCS(等曲率伝熱面)の発見に到ることができた。

しかしまだ花の咲かない失敗も多くある。その最初のものがサーモプレッサーであり、第二はリング状回路シリンダー内燃機関であり、第三は内燃スターリングエンジンである。私にとってもう先は短いのでこれらに何かの花を咲かせることはかなり難しいと思う。しかし「研究とは決して止めないことだ、たとえ中止しても何時かは必ず再開する」というのが私の信念である。その意味ではまだ完全に失敗とは思っていない。

これらを全部書くことは難しいので、ここでは特に伝熱工学に関係の深いサーモプレッサーについて

だけ取り上げたい。

2. サーモプレッサーとは

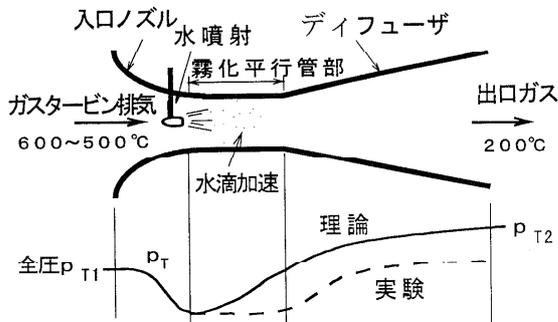
サーモプレッサーはユダヤ系の熱力学者でアメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT)の教授であったシヤピロが提唱した一次元熱流体力学理論から導き出された一種の圧力上昇法であり、彼の理論は難解であるがそれを簡単に言いかえると次のようになる。すなわち、「高速で流れている流体の速度を保存しながら急速冷却すると流体の全圧が上昇する」というものである。これはまた、もし静圧が一定であるとするると動圧 Δp_1 は $(0.5 \cdot \rho_1 u_1^2)$ であり、速度 u_1 が同じで流体が冷却され密度が ρ_2 に上昇したとすると、冷却後の動圧 Δp_2 は $(0.5 \cdot \rho_2 u_1^2)$ となって明かに $\Delta p_2 > \Delta p_1$ である。よってディフューザーでこの動圧を静圧に復元すれば、もとの静圧より大きくなる筈である。つまり熱力学的圧縮機である。

熱力学的にはこの原理は一種の熱機関であって、もとの流体の温度 T_1 と冷却後の流体の温度 T_2 の温度差による出力の発生とも言える。よって原理的にはこの方式によるサーモプレッサーサイクル機関も可能になり極めて興味深いものである。

さてサーモプレッサーは1954年アメリカ海軍のガスタービン高速艇への応用研究が認められ、MITのガスタービン研究所とスローン研へ予算が下り、大々的な実験研究が行われた。その基本方式は第1図に示す通りであって、ガスタービンの排気はまだ高温であって、それを一たん入口ノズルによって高速とした後に、海水をアトマイザーによって噴射霧化し、その冷却効果で低温となりかつ動圧が上昇した高速ガスをディフューザーで昇圧して復元して大気圧で排気すると、その動圧差の分だけガスタービンの背圧が低下するので、その出力が増大するというものである。

私は1955年夏に運輸技研(後の船舶技研)よりMITに行ける事になり、幸いにもスローン研のシヤピロとワドレイ教授の下での研究員となることができた。

サーモプレッサーについては行く前に知ったが、その極めて簡単で興味深い点で大いにほれ込み熱心に研究することを誓った。一方では当時運輸技研では船用ガスタービン研究を始めており、そちらへも貢献できる希望があったのである。



第1図 サーモプレッサーの原理図と圧力分布

3. 実験結果

さて、MITのガスタービン研究所には壁をぶち抜いて長さ20mに及ぶサーモプレッサー本体実験装置が作られ、全長に沿って多数のピトー管が並べられ、ガス入口には燃焼器が置かれ、研究室中央の巨大な空気ブロアーがダクトに送風した。またガスの冷却のための水噴射ノズルが喉部に置かれ、若干の霧化冷却平行管の後に大きなデフューザーが置かれた。

ところが私が到着した1955年秋にはワドレイから第一回実験が不調であったことが知らされた。確かに水噴射によって最終圧の僅かな上昇のあることは確認されたが第一図のようにサーモプレッサー前後の全圧にはごく僅かの上昇しか認められず、期待の40%上昇に対し±4%程度しか上昇しなかったというのである。そのため理論計算が再開されるとともに水の噴霧装置の改良が求められた。私は後者を単独担当することとなり、スローン実験室において液体の霧化(アトマイゼーション)の基本研究を行い、それ自身についてはかなりの成果が上げられたと思っている。

しかし、その後の理論計算や再実験によって次のことがわかって来た。まず第一は水噴射による流れの冷却には大きな流動損失があるということである。すなわち水の霧化自体が水と空気の流れの衝突によって生じ、それが大きなモーメント損失を必要とする。ついで高温気流内の水滴の蒸発も水滴と気流の相対速度による熱伝達によって生じ、蒸発期間を短くしようとする程水滴の加速損失が増大する。またよく気化させるために喉部分の長さを長く

する程、流路壁の摩擦が増大してかえって全圧が低下する。

またデフューザ自体も圧力復元効率をよくても75%程度で大きな損失となる。

そのためこのサーモプレッサーの開発研究は1956年秋で、全圧上昇が40%以上となる有効な見込みが立たないということから中止となった。私も霧化研究からローゼナウの沸騰研究へ移り、私にとっては広い範囲の研究をやれることとなって、それからの私の研究にすばらしい基礎となったのを感謝する。

ここで本論とは外れて私自身の自慢となり心苦しいが、外に書き残すチャンスもないのでここに記すと、当時私は大学院修士過程を並修していて、1957年秋の修了時に全科目オールAのトップとなり修士号の一つ上のアドバンスドエンジニアリングデグリーをもらう唯一人となったことを記して置く。それには霧化における臨界ウェーバー数の実験研究と、ポイリングにおける水の接触角度の実験研究の両方も評価に含まれていた。

4. 超高温サーモプレッサー

帰国してからも私はサーモプレッサーの再興についてがんばった。

まずサーモプレッサーの問題点は高速流(マッハ数1~1.2)の瞬間冷却であって、まさに伝熱工学の一大課題である。

もしインタークーラーのような多管クーラーを用いれば、レイノルズの原理により大きな熱伝達は、大きな流動損失を伴い、流れは失速する。また水噴射によっても、MITの実験結果の示すように水の霧化と加速と熱伝達に必要な流動損失が大きく、よってサーモプレッサー効果は削減される。しからばいかなる冷却方法があるだろうか。

伝熱工学の基本として、物体やガスの急速加熱現象はいくらかもある(衝撃波、デトネーション、燃焼、爆発、核分裂、核融合、等々)が急速冷却はほとんど無い、あっても遅い、という法則がある。これはエントロピーの増大は易いが減少は難しいという法則に近い。サーモプレッサーはこの急速冷却に正面から取り組んでいるものである。そしてその困難さは伝熱工学者としての私の闘志をいよいよ燃やすものとなった。

私は始めは水性ガス反応のような可逆化学変化の吸熱サイドの利用を考え、色々案を出して略算したが、化学変化そのものには二種類以上のガスか気液の混合を伴うので相対速度の差による流動損失を生

じ、また温度の低下とともに逆反応が増大するので変化には限度があることがわかり中止した。

ついで色々考えているうちに、唯一つ採用できる伝熱方式は超高温ガスの熱放射冷却（輻射冷却）であるという所に行き着いた。

熱放射による急速ガス冷却を有効にするためにはガスは H_2O か CO_2 のような放射率の高いガスである必要があり、しかもその温度は $1300^{\circ}C$ 以上に高くなければならず、しかも輝度の点からその流路幅も $1m$ 以上と巨大なものとなる必要がある。

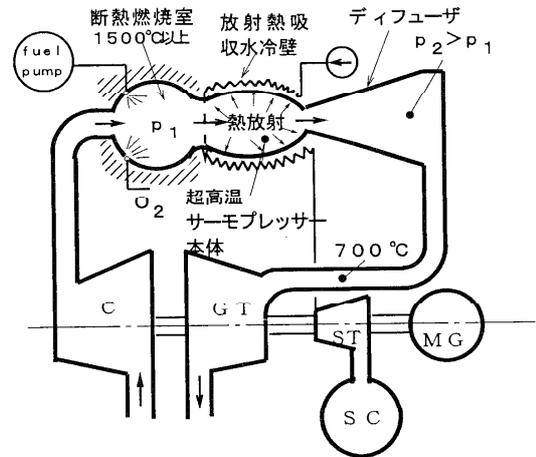
そのため実現はまず不可能であるが、とにかく計算することとし、現在三井造船で活躍しておられ、当時東大の大学院生であった遠藤肇氏の修士論文として共同研究して頂いた。

そのときのサイクル構想の原理図を第2図に示す。この方式は酸素富化燃焼か高温原子炉（これは実現不可能）によって $1500^{\circ}C$ 以上に加熱された高温 H_2O もしくは CO_2 か両者混合ガスを、周囲 $300^{\circ}C$ 程度に冷却された巨大なダクトのサーモプレッサー本体に高速（ $M=1.2$ ）で吹き込み、主として熱放射冷却によってガスを急速冷却することによりサーモプレッサー効果を生じ、ガスの動圧をディフューザーで復元して本体以前のガスより圧力を上昇させ、それを $700^{\circ}C$ くらいのがスタービンで出力化するという案である。

ガスに黒いカーボン粉や灰粉を混ぜると輝度が上昇して冷却効果が上がるが、前の水滴と同じ原理で固気間相対速度の存在は効果を削減するので実施できない、よって流体は単相のガスでなければならない。

この案は実に面白い案であったが、計算してみると、音速クラスの大量の、高速かつ超高温ガスの持つエンタルピーはかなり大きく、我々の考えた長さ数メートル以内の本体内ではとても、熱放射だけでは冷却し切れないことがわかり、やはり装置はかなり長いものとなって壁摩擦の存在によってサーモプレッサー効果はあまり期待できないことがわかった。

この案は火力発電所の放射冷却燃焼室が $1200^{\circ}C$ で流速 $5\sim 10m/s$ くらいに対しあのような大きいものになることからわかる所で、超高温部分は短くてもよいが $1200\sim 1300^{\circ}C$ 以下となると、熱放射の4乗法則によって急激に必要な伝熱面積は増大する。まあいわば現在の大宇宙用ロケットの噴出ガスを急速冷却させるようなもので、計算上若干の可能性はあるが、実現にはあまりにも巨大設備となる。また一方において、 $1250^{\circ}C$ 以上の領域では冷却壁の熱流束は水冷時のバーンアウト熱流束を遥かにオー



第2図 超高温サーモプレッサーとそれを応用する複合発電システム

バーし、高熱流束冷却方法の問題がそこでも生じてくる。

よって、以上の理由により、この案は実行に移されることなく中止となった。

5. 結言

以上のように、私の若い日の夢であったサーモプレッサーは高速流の瞬間冷却という伝熱工学上の大きい宿題を残しつつ中止となった。しかし、私にとっても工学にとっても前記のように中止は一時休みであって決して放棄ではない。このサーモプレッサーの持つ利点や興味はいつまでも残るものとなる。その後沸騰水原子炉で蒸気噴射で冷水を再循環する装置にスチームサーモプレッサーなる名称が付けられているものがあつた。これは従来インゼクター給水装置と同じ原理のものであって、私の言う単相サーモプレッサーとは異なるものである。

「最後まで耐え忍ぶものは救われる」という聖書の一語は私の永年の研究を支える一言であった。私はそれを信じつつ、若い人がいつかはサーモプレッサー効果を実現する日を願うものである。

単一液粒の蒸発実験

Experiment on Evaporation of a Single Droplet

小林 清志 (豊田工業大学)

Kiyosi KOBAYASI (Toyota Technical Institute)

1. はじめに

最初から先が見えているものであるならば、研究の必要性は薄い。したがって、先が見えていない研究では「失敗」は付き物であろう。大小さまざまな不成功の試みを乗り越えて、前進するところに研究開発の大きな意義があるものと思われる。その意味で敢えて不成功例を明るみに出すことも、或いは意義があるかも知れない。

さて、もう半世紀以上も前のことで恐縮であるが、戦時中のことである。筆者は、大学卒業後直ちに棚澤泰教授の研究室に入った。そこでは当時としては全く未開発であった噴流推進式機関内の燃焼の研究をしていた。高速気流中に噴射された燃料がどうしても吹き消えて、燃えないという問題の解決に苦心していた。話は反れるが、この問題は遂に見事に解決されて、終戦直前であったが、初めてのジェット機「橘花」の実現に繋がったことは知る人ぞ知るところである。

2. 計画の背景

さて、戦争が終わって、今度は少し基礎的な考察をしてみようということになって、燃料噴霧粒の燃焼における寿命について検討してみることになった。このことは燃焼室の設計に基本的な指針を与える重要な意味をもっている。

そしてこの燃焼はよく検討すると、蒸発燃焼であるので、燃料粒の寿命はその蒸発速度で決められることになる。これは物理的な問題になるので、与えられた条件下での燃料粒の蒸発速度と、その寿命を伝熱学的考察を行って理論的に求めることを試みた。(1)

その結果は、粒径は時間と共に放物線的に減少する。これを言い換えると、粒径の2乗が時間に対して直線的に減少することになる。そしてその傾斜は粒径に無関係で、雰囲気温度と物性値及び液粒の

物性値によって定まると言う結果が出てきた。そしてその傾斜は「蒸発速度係数」ひいては「燃焼速度係数」とも言うべきものとなり、これを特定することによって噴霧の寿命が求められることになる。

このことは、あくまでも理論的な結論であったので、実験によって確認する必要がある。

どんな実験をするか、その計画が問題である。全く前例も文献もない状態であるので、理論のモデルに合う実験を素直に考えてみると以下のようなになる。

すなわち、一定の高温になる一つの炉の中に、一粒の燃料微粒を浮かせて、その温度での蒸発過程を窓を通して16mmカメラで撮影し、その結果を解析する、と言うものである。

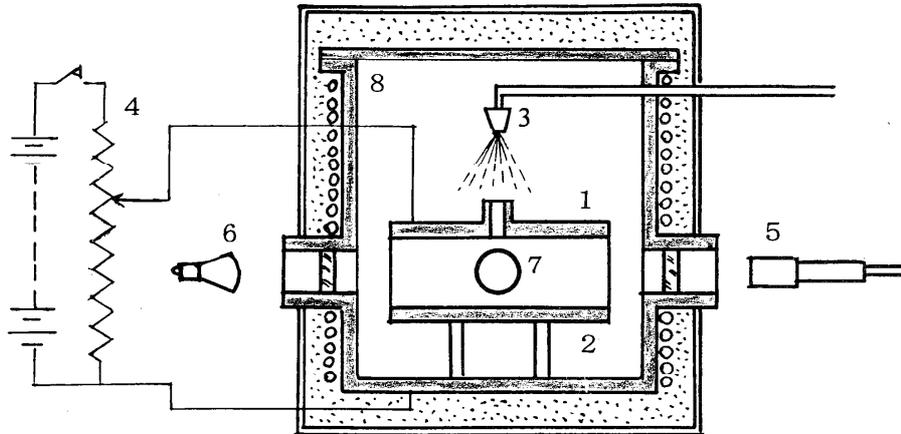
そのためには、一粒の燃料粒を空中に浮かせる必要がある。

そこで、ふと思いついたのが、電子の電荷の決定のために行われた、有名なMillikanの実験である。

すなわち、Millikanの行った実験は、水平におかれた平行平板蓄電器の、上の極板の中心に設けた小孔から小さい油粒を両極板の間に落とす。この時その小孔の上部で霧吹きで噴霧を作るのであるが、このようにして作られる小さな噴霧粒は電荷を帯びることが知られており、平板電極の間に降りてきた油粒はすでに帯電している。或いは極板間の空気をX線で照射すると、イオン化され、生じたイオンや電子は油粒に付着して荷電量を変化させることが出来る。このような油粒は小さいので等速で自由落下するが、適当な位置で極板に電位差を与え、その電場の作用で油粒を上昇させたり、下降させたりして、その速度を顕微鏡で測定し、帯電変化と速度の差から電気素量の決定を行ったものである。

3. 実験装置の試作

このMillikanの方法を応用して、小さな油粒を空中に浮かせ、雰囲気温度を変えて、その蒸発速度を



第1図 試作実験装置

外部から望遠鏡で測定してみよう、というのが一つの発想であった。

そこで、第1図に示すような実験装置を考え、設計製作した。

図において、1, 2, は平行平板電極である。噴射弁3から噴霧を形成し、その内のほんの一部が上部極板に設けられた小孔から自由落下する。両極板には分圧器4からの電圧が印加される。5は望遠鏡でランプ6からの光を背景に中心部の油粒の大きさの変化を測定する。7は必要に応じてX線を照射するための窓である。これらの主要部分は加熱炉8の中に収納されており、加熱炉全体は外箱の中に保温材を詰めて納められている。

4. 実験の結果

さて、これで実験をしてみると、当初考えていたほど簡単な筋書きには行かなかった。

それは、油粒が所要の位置になかなか落ち着いてくれないのである。

その要因は色々あった。

- 1) 炉を加熱すると、内部に対流が生じ、どうしてもその影響を受ける。
- 2) 蒸発により油粒の直径が変化し、したがってその、質量が時々刻々変化する。
- 3) 観察に適する中心位置に油粒を持ってくる

適当な制御方法が、その時には無かった。

などの理由により、この実験計画は思うように進まなかった。種々苦心をしたが、結局不成功に終わった。

5. あとがき

一つの研究が、順調に進むか、不成功に終わるか、については、幾つかの要因がある。

すなわち、課題に対する当事者の熱意、能力、周辺的环境、等は勿論であるが、その他に時代の背景等も考えられる。長い年月が経つと、それらの内、時代の背景が以外に大きな要因をなしているのに気がつく。かつては非常に困難であったことも、時代が進歩して容易に出来るようになった、ということの例が幾つも挙げられる。例えば計測器、実験技術、電算機、その他学術全般の進歩、発展に加え、研究費の額の増加など、今昔の違いが大きな要因となることは否定出来ない。

実験機器や実験技術、さらに制御技術の発達した今日においては、あるいは可能になるかも知れないと思われるのである。

文献：(1) 小林清志、日本機械学会論文集、15, 52, 昭.24 (1949), pp.14-19.

— 水状凝縮の温度履歴 —

Thermal Hysteresis on the Gracial Condensation

武山 斌郎 (石巻専修大学)

Toshiro TAKEYAMA (Ishinomaki Senshu University)

小粒でピリリと辛い!

我が家の庭に、太いが背丈1 m程の山椒の木がある。葉枝を切るといい香りがする。大きい鋭利な刺を沢山もっている。学術論文を読むとき、当然、表題を眺め、次に、結論を、それから、緒言となる。式と図に眼を通し、如何に読むべきかを検討する。学生への指導である。大きい表題の割合には、結論が曖昧なものは、香りと刺をもたない山椒であろう。そのような論文の発表は慎むべきである。

疎水性伝熱面における凝縮熱伝達の特性曲線を、沸騰曲線のように、熱流束と温度差の両軸に示すと、滴・遷移・膜・氷状と変化する一連の曲線となる図1の凝縮曲線を発表(1)して、既に、25年になろうとしている。当時は、凝縮の熱伝達率が非常に大きいので、温度範囲を極低温まで進めるため、熱流束集中方式の伝熱面を使用しなければならないことに気がついてきたが、熱流束を支配する因子は蒸気流量と流速であろうことは予測できたものの、それらをパラメータとする実験よりも、むしろ、遷移する現象の追求が興味の対象となっていた。結果は“遷移”という題命が大き過ぎ、結論が不完全なものとなってしまった。しかも、測定が慎重になり過ぎると、逆に、現象への慧眼が失われ、判断の範囲を狭くするおそれがある。表題の不成功よりも、むしろ、不完全研究となってしまふ。香

りのない刺の曲がった山椒では珍重されない。

知らぬが佛!

凝縮曲線の氷状凝縮熱伝達履歴が存在することを発見するのに、10年の歳月を必要とした。周知のように、履歴はいくつかの物理量が前歴に依存する現象で、自然科学の多くの分野に見られ、強磁性体の磁場の強さと磁束密度、単結晶の応力と変形、あるいは同じく単結晶の誘電率の温度変化に履歴が現れる。図1の水状凝縮部が凹部をもつ椀状をしているが、実は、凝縮曲線の温度軸が左の原点に帰る往復の“復”の場合の実験点であり、椀の蓋の部分に“往”の実験点が充満しているのである。そこが空白になっていることに“不完全研究”であったことを指摘しなければならない。履歴現象は同じ横軸の値

に対し、二つの異なる値をもつ。先に、測定は慎重に行ったと書いた。それは実験値を確実なものにするため、“復”路において、となりの右側の実験値を再確認するため温度に変化を与えると椀の蓋の上部の実験値に、瞬時に飛び、しかも、上部の“往”路の

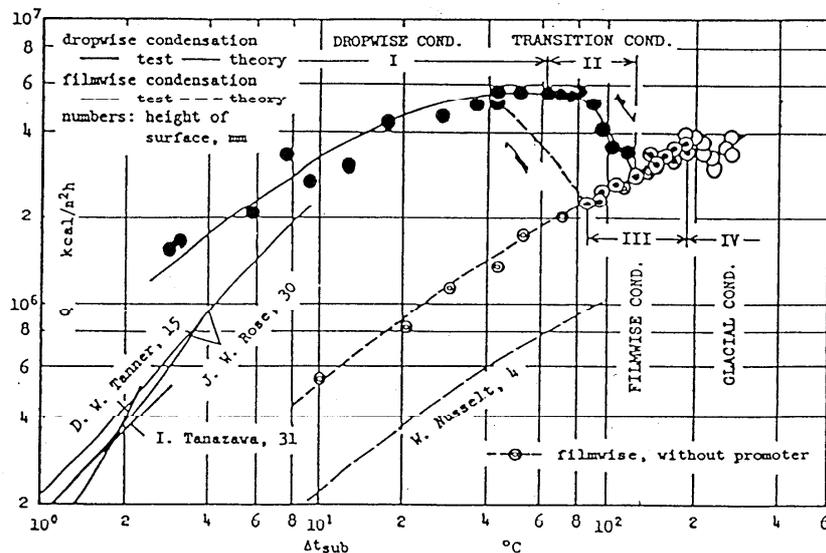


図1 凝縮曲線における滴・遷移・膜・氷状への遷移

条件は熱工学的過敏現象であるために、測定値のパラッキが多く、実験値の安定度が悪かったのが原因である。不凝縮ガスを含む蒸気の凝縮実験(2)により、氷状凝縮における履歴を確認できた。とくに、伝熱工学において過冷却液が存在し、液相から固相

条件は熱工学的過敏現象であるために、測定値のパラッキが多く、実験値の安定度が悪かったのが原因である。不凝縮ガスを含む蒸気の凝縮実験(2)により、氷状凝縮における履歴を確認できた。とくに、伝熱工学において過冷却液が存在し、液相から固相

へ相転移する時の温度履歴は常識的現象であった筈であろう。

慧眼による観察に眼力を！

図2は凝縮曲線への不凝縮気体の影響を、主に、氷状凝縮部について画かれ、あきらかな履歴性を表現している。論文には履歴の往復にそって、伝熱面の正面からの表面の写真が添えてあり、凹凸に見える氷、不透明な氷、透明な氷、そして、氷に割れが入る表情の詳しい解説がそえてある。何故に割れるかは、氷部の温度差と熱膨張率の物性問題であろうことには問題はなかろうが、何故に、氷が透明か、不透明かの機構の解説が明らかでない。不凝縮気体の存在とは無関係の問題であるかもしれない。

家庭の冷凍庫で透明な水を作りたいならば、製氷皿の下に割り箸を並べれば簡単にできる。不透明な原因は、ガスの存在か、それとも空洞か、いずれかであろうし、また同時共存かも知れない。

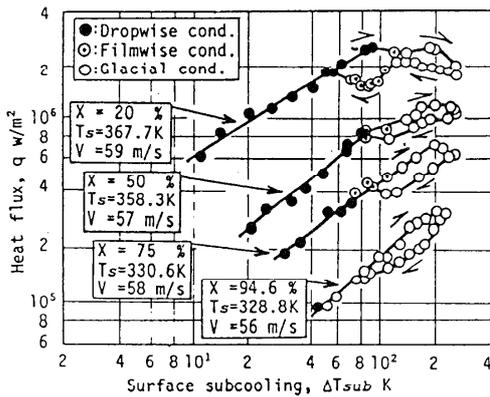


図2 凝縮曲線への不凝縮気体の影響

図の不凝縮気体の含有率の多い程、蒸気は冷却面直前の気体の中で、液体になり、固体となり付着する。つまり、雨となり、雪となる。論文には、伝熱面上に液膜はないとの裸眼観察と膜厚測定の結果もある。勿論、雨も雪も確認されていない。不凝縮気体のない場合を含めて少ないときは、履歴の“往”において、透明な氷が生成され、やがて、小さいき裂の発生と消滅のあと、安定に成長発達し不透明氷となり、熱流束が下がるという。この不透明氷は凝縮曲線の“復”の領域でも消滅しない。履歴を画くことから、同じ伝熱面温度において二つの異なる熱流束値をもつ。著者らは「不透明氷は熱伝導率の低い・・・」と実験的証明もなしに、軽はずみな推論を下してしまった。棚澤先生の御叱正もある。よけいなことを書かなければ良いのに、辛さのない未

完成論文となった。この問題の解決の糸口を見つけるのに、再び10年の歳月を必要とした。

極微小結晶氷の過冷却水中での発生！

図1～2の伝熱面の大きさは直径5mmの小さな円形垂直面であった。図3の水状凝縮の説明のための実験は、横巾4cm 高さ10cmの垂直面で約200倍の伝熱面である。冷却能力に対し、氷状凝縮が実現できる程度まで蒸気流量と流速を制限せざるを得なかったが、現象の観察には便利であった。凝縮曲線における氷状凝縮は勿論のこと、膜状凝縮においても、伝熱面近傍には過冷却水が存在することを推論することは困難でない。この過冷却水中に、突然、直径20μm長さ2～3mmの針状の水結晶が発生することが注意深く観察すれば発見できる。(3)氷状凝縮の開始点であり、伝熱面上に氷の生成・成長が始まる。下部の伝熱面では結晶はシャーベット状に見える程、その数を増す。次第に氷の厚さが増すが、ある程度以上になると結晶氷の発生は消失し、熱流束も少し低下し始める。氷状凝縮の“復”の場合、この結晶は出現しない。これが履歴を支配し、熱流束を増大させる機構ではないのであろうか。

しかし、未だに可視化に成功していない。そして自然界の現象を考える時、凝縮に関係のある霧・霞(もや・かすみ) また霜・霰・霰(しも・みぞれ・あられ)の発生の機構には、雪の結晶のように、神秘的な驚異と感動があるに違いない。再三にはなるが、10年後の2004年、諸兄の発表を期待したい。

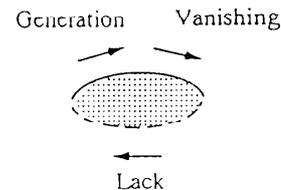


図3 氷状凝縮の履歴と結晶氷の発生・消滅の挙動

文献

- (1) Takeyama, T. and Shimizu, S., Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.,(1974), Cs2.5, pp. 274
- (2) 泉、須々木、武山、日本機械学会論文集 (B編) 50巻454号、(1984) pp.1600
- (3) 原口、島田、武山、日本冷凍協会論文集、Vol. 11, No.3 (1994) pp.383

「研究を評価すること」

Evaluation of Research Projects

平田 賢 (芝浦工業大学システム工学部)

*Masaru HIRATA (Dept. of Systems Engineering,
Shibaura Institute of Technology)*

1. はじめに

伝熱研究における「失敗談」の原稿を集めるという企画に対して、編集担当委員のとられた手順は、敬意を表すべき慎重さであった。アンケートを実施して、50人以上の会員から企画に対する前向きな意見を集められ、発行に踏み切られたのである。このアンケート結果を総括して、編集委員から送られてきた趣意書を見ると、結局執筆者の「研究」に対する自己評価がまとめられることになると思われ、この特集には大変興味深い原稿が集まるものと期待される。

さて、自ら原稿をまとめるにあたって、「失敗」があったかなと思返してみた。事前に予想していた結果とは全く異なる結果が得られたことは、枚挙にいとまがないし、むしろそれがほとんどだと言ってもよいくらいだが、全く失敗だったと反省する研究もなかなか思い当たらない。あえて言えば初期の頃、文部省の試験研究費で二相境界層実験のための堅型回流水槽を作ったが、図体が大きすぎてとうとうほとんど使わなかったことを白状する。もはや時効であろう。これ以降は、実験装置はなるべく手細工で、小さなものをつくることに徹した。

ほとんどの実験が、思い通りにはならなかった。

亡くなられた東大の田中先生や現三菱重工の柘植さんらと超臨界圧流体でも亜臨界と同様に沸騰あるいは二相流もどき状態が発生していることについて、九大の西川先生ほかの方々と議論を闘わせた時代が懐かしい。多年にわたり衝突噴流を手がけたが、岐阜大の熊田先生、現三菱重工の仲戸川さん、現東芝の横堀さんと二次元衝突噴流のよどみ点付近の流れをスモークワイヤで可視化したときには、予想もしなかった縦渦が発生していた。現名大の久木田先生と超音速噴流を平板に衝突させたときには、そ

の発生音にも肝を潰したが、ノズル出口と平板の間の距離に応じて規則正しく熱伝達率が波を打った。東大の笠木先生、岐阜大の熊田先生、現日本IBMの細谷さんとタービン翼の全面膜冷却の実験をやったときには、予想に反して腹側に吹き出した空気は翼面から剥がれ、背側に吹き出した空気はよく翼面を覆ってくれた。笠木先生、現三菱重工の入谷さんと、「層流底層」が層流でなく縦渦が規則正しく発生していることを可視化したときには興奮した。

後で考えてみれば当たり前のことばかりだが、予想どおりならず、新しい現象を見いだす、あるいは創り出すことができるから実験をやる意味がある。どうもコンピュータ・シミュレーションには信用がけない。

2. アメリカにおける壮大な「失敗」実験

1997年7月28日付の日本経済新聞朝刊に、アメリカで行われていた生態学実験研究施設「バイオスフィア (Biosphere) 2」訪問の記事が掲載された。筆者自身も1992年6月に訪れたことがあり、結果がどうなったか気にかかっていた。施設はアリゾナ州ツーソン市郊外、灼熱の砂漠地帯に建てられており、建築面積が12,000 m²の巨大なドームである。我々の住む既存の地球生態系を「バイオスフィア1」と定義し、この生態系を持ち込んで第2のミニ地球生態系を人工的に実現できるか否かを実験で確かめようというものである。

施設内は熱帯雨林、サバンナ、低湿地、海、砂漠、農地、人間生活区の7つの気候をシミュレートする区域に分かれているが、区域間に仕切はなく大気は全体を循環する。実験開始まで4年以上の歳月をかけて、それぞれの気候に対応する独立の植物園を造り、予備実験、排泄物・ゴミ・水・空気のリサイクル設備の機能実験など、慎重な準備がくりかえされ

た。海のシミュレーションでは、深さ 8 m の水槽を造って波や海流を模擬して、魚、珊瑚などを飼育する。塩水と淡水のそれぞれ沼を造る。山も 2 つ造り、上からミストを降らせて霧や雲をシミュレートする。

植物、動物はすべて検疫を経て施設内に持ち込むが、植物は 300 種類以上、食用植物としては米を主体に 150 種類以上、動物は山羊、ニワトリ、豚などを持ち込んで自給自足を目指す。エネルギーだけはコージェネレーションで冷房主体に外部から供給する。実験を開始すれば、外界と遮断されるので、万一のためのバックアップは二重、三重に考えている。施設は厚さ 6 mm の 2 枚のガラスの間に 6 mm のプラスチックを挟んだ断熱ガラスで覆われ、床、壁もすべてステンレス鋼製の気密構造で、外部大気とは洩れ率 1 % 以下で隔離されている。室内の気圧を一定に保つために大きな半球状の建屋を 2 つ造り、ダイヤフラムと重錘の自重とで空気の膨張・収縮に対応している。

1991 年 9 月に男女 4 人ずつの研究者がたてこもり、2 年間の生活を開始した。我々が訪問したときも外部からガラス越しに内部を覗くだけであったが、作業中の研究者や動物の姿が見て取れた。マスター・マインドにあふれたこの壮大な実験は、私企業が 3,000 万ドル (36 億円) を投じて企画したものである。

日経紙によれば、施設内は生態系のバランスが崩れて数百万匹のアメイロアリが繁殖している。生態系の変調は予想外に早く現れ、人間の住める環境ではなくなった。持ち込んだ約 3,000 種の昆虫は相次いで死滅し、一時はゴキブリが繁殖したという。ニワトリは卵を生まず、山羊も乳を出さなくなった。食糧不足は深刻となり、体重が 25 kg 以上減った研究者もいた。致命的だったのは、施設内部の酸素が急激に減ったことだという。実験開始から 1 年 3 ヶ月後には、大気中の酸素濃度が 14 % まで低下し、研究者達は高山病に似た頭痛や疲労感に襲われたので、酸素は急遽補給された。施設内部の土壌に繁殖した微生物の呼吸が予想以上に活発で、酸素量が急減したものと考えられている。実験は当初の計画どおり、2 年後に終了して 1995 年には最終的に打ち切れ、施設の運営はコロンビア大学に移管され

た。現在は施設の一部を使って、二酸化炭素濃度の植物に対する影響の実験だけが続けられているという。

この壮大な実験は、一見 "失敗" に終わったようにみえる。しかしこの実験が示したことは、地球の生態系は非常に微妙なバランスの上に成り立っており、人間と環境との相互依存の関係を人為的に制御することが如何に難しいかということであろう。二酸化炭素濃度の増大と地球温暖化の相関があるとなかろうと、二酸化炭素濃度を増加させるだけで人類は生態系のバランスに対して未知な状況を作り出している。温暖化の徴候が現れたらもはや手遅れで、生態系のアンバランスはさらに加速度的に進むかもしれない。我々は自然に対して、もっと謙虚にもっと真面目に取り組むべきことを示唆しているのではないか。この実験は、失敗どころでなく、実に重大な成果を生み出したということができよう。

3. 研究の評価

筆者もだんだん齢を重ねて、研究費の審査や国家プロジェクトのチェックなど、研究を評価する立場に立たされることが多くなった。上述のように、どのような研究でも予想外の結果が出るから面白く、研究をする意味があるのであって、テーマの選択の段階から点数を付けるようなことはすべきではない。とは言うものの研究費は無限ではない。やむを得ずふるい落とすことになるわけだが、可能な限り幅を広げて取り上げるべきであろう。

テーマの選択の段階ではできる限り広く取り上げた後、中間評価を頻繁に、かつ厳しく行う。つまり、「入るを易く、出るを難しく」するのである。丁度、アメリカの大学の入学試験と同様であるが、日本人には馴染みが薄い。評価する側も、何度か研究実施側と顔を合わせているうちに次第に情が移って甘くなる。科研費も特に通産省の国家プロジェクトなどは国民の税金である。無駄使いは厳に戒めねばならないが、研究評価の難しさを身に沁みて感ずるこの頃である。

家庭冷房機用熱交換器の原価低減

Cost Reduction of the Heat Exchanger in Domestic Room-cooler

藤江 邦男 (新明和工業 (株))

Kunio FUJIE (ShinMaywa Industry Co., Ltd.)

1. まえがき

研究開発での失敗は大学と企業では本質的に異なり、企業では研究開発の成果が製品化、または少なくとも製品に生かされ、市場で販売されて企業の業績に多少なりとも寄与しなければ、その研究開発は失敗である。何れの企業においても、失敗の理由が市場調査、企画の計画過程、開発、設計の研究過程、生産、検査の技術過程、販売、市場開拓の営業過程の何れにしても、研究開発の成否は研究部門が握っていることは否めない事実である。

しかし、或る専門分野に所属する一人の研究者、技術者としては、与えられた責任範囲を担当して、他分野の研究者、技術者と協力しプロジェクト体制で、一つの製品を完成するのが普通であり、この場合、一人ひとりの研究者、技術者に対する成否の判定は、個人として如何ともし難い要因にも左右されるため困難で、プロジェクトの成否はリーダーの責任となり、リーダーが評価の対象となるのは必然の結果である。リーダーは研究開発過程だけでなく、企画から市場開拓まで製品化の全過程の責任者にされるので、勿論それなりの権限も付与されて当然である。しかし、日本の企業では職制ラインが強く、一定期間のプロジェクトのリーダーに強い権限が与えられることは、最近までは少なかった。一方、企業での研究開発の成否は、他社の後追い開発は初めから問題外であり、少なくとも先行的研究開発でない、成功の確率が高いので、成功しても社会的評価は低い。また、現在の情報社会では、各社ほぼ同時に同じ目的で研究開発を始める場合も起こり得るが、その際の成否は担当した研究者、技術者の技術的能力より、リーダーの成功への情熱と忍耐の差の方が大きい。研究開発の失敗を次の研究開発に生かす否かは、研究者、技術者本人の心掛け次第であり、常に改革を目指している者は将来が期待できる。

以上のように、企業での研究開発の成否は研究部門だけの成果では決まらず、企業内の関連部門が関係するので、研究部門では如何ともならない場合があるが、決して解決できないこと許りではなく、困難を乗り越える活力が有れば成功することも可能である。

2. 開発経過

私が研究分野の転換を意図して、流体機械から伝熱機器の研究開発へ比重を移したのは、昭和30年代末頃からで、ここで記述する開発課題が最初であり、それ以降の研究開発仕法の改革に強い影響を与えた。その頃は日立の中央研究所に勤務しており、一つの研究ユニットのリーダーで、一介の研究者であったので私が一人で担当した。当時、中央研究所の研究運営として、自発研究と依頼研究の二本だてであった。自発研究は本社からの資金により運営されていたが、依頼研究は依頼先の工場からの提供資金で実施されており、工場側の意向が研究課題に強く反映される傾向があった。

当時の家庭用空調機はウインド型で冷房専用機であり、一般家庭では高根の花で、会社の職場でも冬の暖房は普及していたが、夏期に冷房しているところは少なかった。当時、日立の栃木工場(現冷熱事業部栃木本部)では、昭和37年家庭用ルームクーラの室内側に電気ヒータを取り付け可能とし、年間使用の設計とした機種を販売している。昭和41年になると、政府の高度経済成長政策により、ルームクーラは3C(Car, Color TV, Cooler)時代の一商品として、脚光を浴びることになる。

昭和40年前後は大変不景気な年であり、このような時に工場からルームクーラの熱交換器(凝縮器、蒸発器)の原価を1/2にする、研究開発の依頼を受けた。その条件として原価を半減しても熱交換器の性能は同等又はそれ以上で、しかもルームクーラの外観寸法と熱交換器以外の部品並びに配置などには、一切手を加えないことであった。すなわち、熱交換器以外は手を触れてはいけない条件であった。このため新しく開発する熱交換器は元寸法と同じか、それより小さいことが必要な上に、通風抵抗をも同等以下にする必要があった。

先ず、開発に当って、従来の熱交換器の冷媒側と空気側の伝熱性能を調査すると共に、使用材料費の分析を行ない、銅管の使用量を如何に短かくするかが成否のポイントであった。伝熱解析の結果、銅管の長さを1/3強にできる見通しが得られたので、3列の銅管(9.5φmm)を1列にし、その代わりにア

ルミ平板フィンのファン間隔を2.0 mmから1.5 mmに縮めて、フィン枚数を増加して空気側の伝熱面積を増し、冷媒側と空気側の定常運転条件での伝達熱量のバランスを図った。この際、空気側の熱伝達率はフィン間を通過する風速に影響されるため、ただ単にフィン間隔を縮めてフィン枚数を増すと、通風抵抗も増加し、風速が低下してフィン面積を増加した程には、伝熱量は増加しない。この問題を解決するために、図1に示すスタガーフィン付熱交換器を考案した。

当時のルームクーラは現在のエア・コンディショナとは異なり、特に形状寸法が大きな室外部分の凝縮器は、冷却する軸流ファンの下流側にあり、ファンからの旋回流が直接凝縮器に当たるため、フィン入口側先端部での通風抵抗が大きく、フィン間風速が減少して、従来の平板フィンでは目標の風速が得られない。

このためにフィン入口側先端部で、フィンを交互にずらすことによって、フィン入口部のフィン間隔が倍に広がり、更に銅管の列数も3列から1列に減少したため、フィン枚数を3割強増やしても全通風

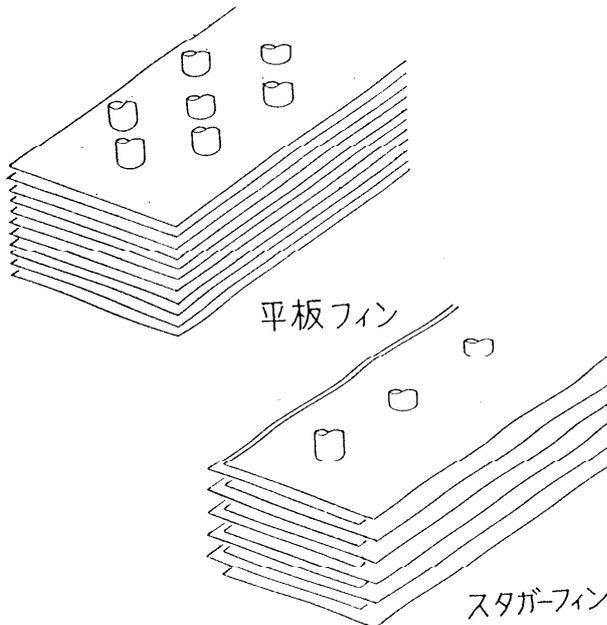


図1. 平板フィンとスタガーフィンの形状

抵抗を同等にすることができた。一方、フィン間隔を狭めたので、土ぼこり、綿ぼこりなどの汚れによる通風抵抗への影響を調べるため、熱交換器と軸流ファンの組み合わせ試験装置を製作して、室外で長時間試験を実施し、何ら問題ないことを確認した。

以上の研究開発によって、改良した熱交換器付ルームクーラを2台試作して、工場のカロリーメー

タ室に入れ、性能試験を行った結果、従来品と同じ冷房性能が得られた。原価についても工場側で試算した結果、目標は達成されたことが認められた。本来なら、このまま製品化され市場で販売されることを期待していたが残念ながら製造は工場の事情により中止された。

その理由を工場に問い合わせたところ、熱交換器にスタガーフィンを使うと、熱交換器の部品製造、組立作業が多少変更になるので、現在の生産量では余りうまみがないとの回答であったと記憶している。

後日、工場での性能試験などで私に協力した技術者から聞いた話によると、当時はルームクーラは高価で生産台数もそれ程多くなく、売上高利益率も現在とは違って30%もあった。一方、開発当初は景況が悪かったが、開発終了時には昭和40年代の高度成長期にかかり、市場が大きく変化したこともあって、原価低減の必要性を感じなかったのが本音のようであった。

何時の時代でも製品化を目標とする研究者、技術者に取って、市場動向は重要な関心事の一つでなければならない。この研究開発は今から30年以上も前の話であり、研究背景にも今昔の感じがある。

3. むすび

750ワット家庭用ウインド型ルームクーラ熱交換器の原価半減の研究開発は、試作機の性能試験を目標達成で、一応終了したが、量産されずに中止となったので、企業の研究開発として失敗であった。この反省として、製品化を目標とする研究開発では、開発設計は基より生産技術も同期化して推進する必要性を強く感じて、その後の研究開発では実行するように心掛けてきた。

開発技術者または責任者は開発した製品が市場へ出荷されるまで、自分に責任を感じて、先ず社内の関連部署に製品化することを説得する努力が第一である。それでも社内で利用されない場合は、広く市場を調査して、他社に売込んで投資を回収する方が、社会にも自社にも貢献するので、これを妨害、阻止する理由は企業内には何処にもないことを自覚し、常に立ちはだかる問題を解決する意識を持って、行動すべきである。

このことは所謂、現代で言う企業内ベンチャービジネスを自分の責任において実行することであり、この失敗物語が少しでも参考になれば幸いです。

「未成功」は「成功」の素^{もと}

Failure is a step to success!

棚澤 一郎 (東京農工大学)

Ichiro TANASAWA (Tokyo University of Agriculture and
Technology)

1. 蓼科伝熱セミナーのこと:

もう四半世紀ぐらい前のことになるであろうか。現在は各地区ごとに実施されている夏期伝熱セミナーが、当時は全国的な行事として行われていて、その年は今は亡き慶応大学の小茂鳥先生が実行委員長を勤められていた。会場は蓼科高原にある慶応大学の合宿所のような施設であった。

このセミナーの中で、多分夜の放談会のような形式だったと思うが、小茂鳥先生が司会をされ、出席者に伝熱研究での失敗談を披露してもらおうという企画があった。

「伝熱研究」編集委員の小澤さんから、今回の企画についてのファックスを受け取ってまず頭に浮かんだのは、その蓼科での伝熱セミナーのことであった。

ただどうした訳か、小茂鳥先生が司会されていた会場の雰囲気はどうやら記憶に残っているものの、その「失敗談セッション」でどんな面白い(あるいは、為になる)失敗談が出席者から披露されたかについては、殆ど思い出すことができない。僅かに憶えているのは、私自身が指名されたとき、話すべきよい失敗談が頭に浮かばず、冷や汗をかいたことぐらいである。しかし、セッションの中味はともかくとして、あの蓼科の伝熱セミナーは「失敗談セッション」の企画によって強く私の印象に残ったセミナーであった。

小澤編集委員からの今度のご依頼についても、蓼科のセミナーの時と同じような戸惑いを覚える。第一、失敗を人に話すということは、それだけでも心理的な抵抗が大きい上に、他人に役立ちそうな失敗談が依然として思い浮かばないからである。「失敗から学ぶ」とか「他山の石とする」とか(多少ニュアンスは違うが)「反面教師」などという言葉があるように、自分あるいは他人の失敗や欠点や不成功から何らかの教訓を得るということは、よく耳にする話ではあっても、研究の本道から見るとそれは

ちょっとした付録のようなものでしかないという気が常にするからである。しかし、この企画に対する小澤さんの熱意は相当なものであり、また企画自体も「失敗談」から「未成功研究」へと看板替えされたようでもあるので、企画本来の意図に沿うものであるかどうかを危ぶみつつ、私の古い体験を書いて見ることにしたい。

2. 電磁流体力学研究のこと:

大学院の修士過程に進学するとき、私は原子力の勉強をしたいと思い、東京大学の機械工学科の渡辺茂先生の研究室に入れていただいた。ご存じの方も多いと思うが、渡辺茂先生は、初期の頃には機構学や振動学の教科書、後にはマイコン関係や一般向けの科学啓蒙書などの著述で知られ、東人を定年退官された後は、都立科学技術大学の学長を勤められた極めて多才な先生であったが、私が学生の頃には原子力工学教育の推進者の一人でもあった。

一口に原子力といってもいろいろな研究テーマが考えられる中、私はどういうわけか伝熱をやる気は殆どなく、炉物理への興味が強かった。ところが、指導教官の渡辺先生は、私の大学院進学の前年に米国のMITに留学されてしまい、私は研究テーマを決めかねるまま暫くぼんやり過ごしていた。そんなところへ米国の渡辺先生から手紙が届いて、米国では電磁気学と流体力学とを合わせたような新しい学問分野が盛んになりつつあるので勉強してみないかというように書かれてあった。この新分野が電磁流体力学(MHD)であった。

やがて渡辺先生が帰国され、数冊の参考書を私に渡された。また、注意していると、海外の学術雑誌には電磁流体力学関係の論文がいくつか掲載されていることもわかった。さらに、私にとっては絶好のタイミングで、理学部物理学科の今井功先生が電磁流体力学の講義を新しく始められた。

このようにいくつかの偶然が重なって、私の修士

過程での研究テーマは、円管内での MHD 流れに関するものになった。

この時の私の研究は、円管内での導電性流体の流れが外部磁場によってどのような影響を受けるかを解析と実験によって明らかにするという、今から考えるとまったく基礎的なものであったが、当時はこの程度の研究でも、電磁流体力学の分野であるがために一応新規性のある研究として評価していただけたようである。

この研究で私は数多くの失敗を重ねたことを思い出す。

例えば、私は大量の水銀を実験に使っていたが、その水銀は 1 リットル程度の容量のナイロン製の瓶に入っていた。そのような瓶を数個、私は実験室の床に置いていたのだが、修士 2 年の正月休みから戻ってみるとそのうちの 1 個から水銀が漏れ出してしまっていた。比重の大きい水銀が、ナイロン瓶の底にピンホールをあけ、そこから外に漏れ出したらしいのだが、研究室では部屋中に散った水銀の回収と床の張り替えで大騒動になり、私は多大の迷惑を皆に掛けてしまった。しかし、渡辺先生は「二重の安全性が必要ということだな」とおっしゃっただけであった。

この他、水銀が空気に触れるとすぐに酸化皮膜ができること、ほとんどの金属とアマルガムを作りやすいことなどで実験には随分苦労したが、これらはすべて知識と経験の欠如によるものであった。とくに今になってヒヤッとするのは、水銀の取り扱いにまったく無神経であったことで、現在の安全基準からみればとうてい許されないような杜撰な管理をして平気であった。

また解析でも、苦労して級数展開によって解を求めてはみたものの、ベッセル関数を小数点以下十数桁まで計算することが(当時の手廻しのタイガー計算機では)できず途方に暮れたことなど、失敗と苦労は山ほどあるが、それらを一々書き連ねることは本企画の趣旨から外れるであろう。

なお、ひとつだけつけ加えさせていただくなら、当時の私は電磁流体力学の最大の応用分野は核融合プラズマであろうと考え、そちらの分野に進もうという気持ちも多少あったが、諸々の事情から伝熱の分野に進むことになった。ただ、電磁流体力学に対する興味はずっと持ち続けていた。

3. アルミニウム電解炉のこと：

私が東京大学生産技術研究所に奉職して数年経った頃、アルミニウムの精練を行っている企業から相談を受ける機会があった。現在、アルミの精練は日本では殆ど行われていないように聞いているが、当時はかなりの花形産業であった。

ご存じの向きも多いと思うが、アルミニウムの精練は、大きな電解槽の中に原料のボーキサイトと氷晶石を入れ、これに大電流を通じて熔融電解するという方法がとられており、この意味でアルミニウムは「電流の缶詰」とも呼ばれていた。

電解炉に大電流を流すために、カーボン製の巨大な電極が設置されているのだが、問題はこのカーボン電極を流れる電流が一樣にならず電解効率が低下するということであった。そしてその原因は、どうやら融けた金属アルミニウムの液面が、なぜか水平にならず、ある場所では隆起し他の場所では降下するために、アルミニウム液面と電極面との距離が不均一になることによるらしいと推測されていた。問題(そして私に持ち込まれた相談)は、なぜこのようなアルミ液面の変形が生じるのかということであった。

当然のことながら、電流には磁場が付きものである。相談を受けてまず私が考えたのは、電流/磁場/導電性流体の三者の組合せでアルミ液面に力が作用し、それが液面を変形させるのではないかということであった。そこで解析をしてみると、不均一磁場の下では、導電性流体の界面は彎曲するという結果が得られた。この時の解析で、私は熔融アルミの流動を無視した。その理由は、強い磁場の下では、ローレンツ力が導電性流体の運動を抑制するから、良導体のアルミニウムの場合にはその流速はごく小さいだろうと考えたからであった。

もう細部については憶えていないが、私が解析によって求めたアルミ液面の隆起の大きさは、作動中の電解炉で実測された値より大分小さかったように思う。その原因は、炉内の液面位置での磁場の強さの推定の不確かさによると当時は考えた。電解炉内の磁場は、電極間を流れる大電流によるものが一番大きいですが、電流が不均一であると、液面での磁場の分布を推定することがきわめて難しい。さらに、電極に電流を送り込む導線(実物は分厚い銅板)まわりの磁場がこれに加わる。もしこれらが正確に判れば、私の解析でもよい精度でアルミ液面の変形が予

測できるものと信じていた。しかし、この問題についてのこれ以上の議論は、私の米国留学によって未解決のまま放置された。

それから十年程経った頃だったと思うが、札幌での伝熱シンポジウムの終了後、これも今は故人の片山功蔵先生（当時東京工業大学）のお誘いで、苫小牧にあるアルミニウム精練工場を見学する機会があった。ただし、この会社は十年前に私が相談を受けた会社とは別の会社であった。

その折の懇談の席で、たまたま熔融アルミニウム液面の隆起の話題が出て、私はその数年前にフランスの研究者が流動を考慮に入れた電磁流体力学解析によって、アルミニウム液面の変位量を求めるという論文を発表していることを知った。その時私が得た教訓は、直感のみに頼って安直に結論を導くのではなく、徹底的に問題を追いつめなければいけないということであった。

4. 滴状凝縮研究のこと：

本号の企画である「未成功研究」という主題にもっとよく合致するのは、私の研究室ではほぼ20年間にわたって取り組んだ滴状凝縮に関する研究ではないかと思う。ただし、誤解を避けるために予めお断りしておきたいのは、この研究が未成功であると私が考えるのは、滴状凝縮の実用化という側面についてであって、基礎伝熱研究としてはかなりの成果を挙げたものであることは、邦文・英文合わせておよそ20編に及ぶ研究論文によって実証されていると考える。

私にとっての心残りは、滴状凝縮の研究を始めてすぐの頃から意図していた実機への応用が、30年を経た今になってもなお、殆ど目途が立っていないことである。

よく知られているように、滴状凝縮という気-液相変化伝熱過程の最大の特徴は、熱伝達率がきわめて高いということである。例えば、1気圧の水蒸気の場合、膜状凝縮で得られる熱伝達率は高々 $10 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$ である。これが滴状凝縮になると $200 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$ すなわち膜状凝縮の20倍という高い熱伝達率を得ることができる。どのような高性能凝縮管を用いても、膜状凝縮の熱伝達率を数倍以上に高めることは至難の技であるから、滴状凝縮における20倍という数字は魅力的である。しかも、膜状凝縮の伝熱促進のためには、伝熱面上に微細なフィンを

加工したり、(実用化には至っていないが)排液板を設けたり、電場を印加したりといった手間とコストの掛かる工夫が必要であるが、滴状凝縮では伝熱面表面の濡れ性を変えるだけで済むという大きなメリットがある。

問題は、金属表面の濡れ性を変え、凝縮面上で液が拡がらないようにするのが意外に難しいということである。

このことについては、私も方々に書いているので詳しい話は省略するとして、現在のところ、実用的なレベルでの滴状凝縮面を得る方法として有力なのは、テフロンのような撥水性高分子の薄膜で表面を被覆することである。純金属であれ合金であれ、金属原子が表面に露出しているような状態では、水でも他の液体でも面上に拡がると考えてよい。金めっきやクロムめっきを施した表面で滴状凝縮が起きるといふ報告があり、私達の研究室でも金めっき面を実験に使ったことがあるが、この場合には、めっき液中に含まれている化合物成分が表面の金属組織中に分散しているためと推測されている。

ところで、もっとも有力といわれているテフロン被覆の問題点は、被膜が厚過ぎると、テフロン自体の低熱伝導性のために熱抵抗が増加して、滴状凝縮の利得を帳消しにしてしまうということであり、それかと言って被膜が薄過ぎると、強度や耐久性が不足するということである。

私が滴状凝縮の研究を始めて間もない頃、研究所の教官輪講会で滴状凝縮の話をしたところ、直後に工業化学分野の先生から、ご自分達が開発中の技術で撥水性表面を作れるかも知れないという耳寄りな話をいただいた。その技術というのは、金属のめっきに似た方法で、高分子のモノマーを含む電解液中に電極を置いて電流を流すと、一方の電極の方にモノマーが引き寄せられ、電極上に析出しながら重合反応を起して高分子膜が形成されるというものである。この電極を凝縮面に置き換えればコーティングができることになる。

この方法の長所は、電流量の制御によって高分子膜の被覆厚さをいかようにもできる点にある。私は直ちにこのいい申し出に飛びつき、滴状凝縮の実用化に興味を持っていたある企業の協力も得てテスト実験を開始した。大きな期待を抱きながら・・・

しかし、結果は期待通りとはいかなかった。厚い被覆を施した伝熱管では滴状凝縮が観察されたが、総括熱伝達率は低く、逆に被覆を薄くすると撥水性

が不完全であった。いろいろと条件を変え、多数の凝縮管をテストしたが結果は芳しくなかった。

結局この試みは不成功であった。恐らく、テフロンのように他の物質との親和性の弱い物質は、ある程度の厚さがないと基盤の金属に強くは付着しないのであろうというのがこの時の結論であった。その後撥水性表面の製作技術については、文献調査なども含めて随分努力したが成功に至らず、私としては10年程前に断念した。

同様な努力は、英国や米国でも一時盛んに行われたがいずれも不成功であり、その後新たな情報はまったく途絶えてしまっている。また、数年前中国の研究者が、ある種の合金製の凝縮管を用い、有機材料によるコーティングなしで長時間滴状凝縮を実現したという報告を聞いた。画期的な成果と注目していたが、その後報告が途絶えたところを見ると、長時間のテストは成功しなかったのではないかと思われる。

前述のように、滴状凝縮の長時間維持は大変魅力的な課題であり、技術的困難もさほどではないように見えながら、未だに成功の報に接していない。この数年、私は滴状凝縮に関する展望論文を書く機会が何度かあった。その度に、滴状凝縮研究で唯一残された重要課題は、伝熱面の撥水性を長期間にわたって維持する技術の開発であり、それ以外の基礎的(?)研究には殆ど意味がないという主旨のことを繰り返し書いた。これは、未成功研究に対する私の心残りの表明であると同時に、最も重要な問題を避け、相も変わらず瑣末なことにこだわり続けるこの分野の研究者に対して、私が感じているフラスト

レーションの吐露でもある。

5. 「失敗」と「不成功」と：

本特集の企画は、最初伝熱研究における「失敗」についてであり、次に「不成功」研究に変わった。この変更について兎や角言う積りはさらさらないが、執筆者としては二つの言葉の違いについていると考えさせられた。

判りやすい例として陸上競技、例えば走り幅跳びを考えて見ればよい。ある選手が記録(世界記録にでも自己記録にでも)に挑戦し、一つのトライアルで記録を更新できなかったとすると、そのトライアルは「失敗」である。しかし、彼あるいは彼女が挑戦を諦めない限り、これは「不成功」でもあるだろう。ごく単純な例ではあるが、このことから判るのは「不成功」は本人の意志または主観にかかわるところが大きいということである。しかし、その研究あるいは技術開発の目標が、本人以外にとっても意味のあるようなものである場合には、「不成功」であっても「失敗」であっても、トライアル自体がそれなりの評価を獲得しうる。ただ、当然のことながら、「不成功」は成功を約束するものではなく、むしろより多くの不成功の可能性を秘めているであろう。

滴状凝縮の実用化は、私にとってはもはや「不成功」研究であるが、今後他の誰かによる成功の報がもたらされ、私の試みがそれほど間違っただけではなかったということを立証してほしいと願っている。

「伝熱研究における失敗談」

---原理は易し、結果を得るは難し---

Principle is simple, but getting result is not easy!

井上 晃 (東京工業大学)

Akira INOUE (Tokyo Institute of Technology)

はじめに

研究の失敗談＝未成功談の執筆を依頼された時、あまり乗り気がしなかったが、結局、依頼者に押し切られた形で引き受けてしまった。これを書いている今も同じ気持ちである。それは失敗例を公表するのが恥ずかしいという依頼者が懸念している心持ちからではなく、全く反対で、私の場合、これまで公表した研究のすべてが、ある意味で失敗＝未成功部を持っていると思うので、改めて、失敗談を示すは気が引けるというのが偽らざる心境である。

研究は動機、目的、方法、解析、および、結論の各段階で失敗が潜み、また、これらがすべて成功した場合でも、これが利用されなければ、失敗ということになるかもしれない。また、応用まで含む工学分野では、価値判断の基準が真理のみでなく、多様な評価面があり、単なる成功や失敗では表現できない。

ここでは途中で投げ出してしまった失敗以前の例を失敗例として紹介することにしたい。

失敗研究の概要と当時の状況

30数年前、丁度、博士課程の1年に進んだ年で、確か、1963年頃の古い話であるが、課題そのものは、現在も最先端の技術を駆使して、未だに研究されているので取り上げた。

あとに原研へ行き、軽水炉の事故時の熱流動研究を進めたM氏が学部4年の卒研生であり、一緒に数ヶ月間悪戦苦闘したが、結果として若さにも関わらず、息切れして中止してしまった研究である。当初、若さと粘りに任せてやれば、原理は簡単だから、何とか意味ある結果が得られるだろうと、がむしゃらに進んだ意味で、印象深く、苦いしかし懐かしい思い出となっている。

研究しようとした課題は、気液二相流の気泡流の流動機構に関する測定であった。

あまり古い話なので、若い方々のために、当時の二相流研究の状況を少し説明する必要があるかもしれない。

当時は、二相流の2次元流動機構についての研究は未だほとんどなされていなかった。

Bankoffの均質流モデル(流速分布と局所ボイド率分布をそれぞれ1/n乗則分布で表現して、分布因子 $K=0.71$ を導出した論文)が1960年頃であり、ZuberのDrift flux modelの論文(1965年頃)が出る前で、確か、Mixing length theoryを気泡流に適用したLevyの論文が出たのが、1963年であったと記憶している。このLevyの論文に刺激されて、気泡流の流動機構を何とか測定したいと計画したのである。

当時、局所ボイド率測定の探針法は知られていたが、直流で気液相の通過に伴う台形信号の長さを一つ一つ測定していた頃である。放射線計測で急速に発達してきたパルス技術を適用して信号の識別と統計処理による画期的手法を駆使した測定は、飯田嘉宏先生(横国大)が最初に試みられたが、この計測法が発表されたのが1966年頃と記憶している。

しかし、何とかして、管内気泡流の流動機構、すなわち、液相の流速分布、気泡の速度分布と気泡径の分布、および、局所ボイド分布を同時測定することが出来ないか逡巡していた。これらの分布の同時測定が精度良く出できれば、Bankoffの手法で分布因子やスリップ速度が容易に求められるし、圧損測定を加えて、気泡流の混合長または乱流拡散係数なども導出されるので、当時としては、画期的な実験研究になると考えられた。

結局、試みた測定方法は、以下の様な原始的な写真撮影によるトレーサー法であった。

内径40mmの透明なアクリル製垂直管内を流れる気泡流に、レンズ効果で気泡が変形して観測されないように、円管の周りに矩形上の水を満たした箱で覆い、この外部から輝度の強いキセノンランプを光源として、大口径のレンズで並行光線を作り、剃刀の刃でスリットを構成して、垂直方向に5cm、奥行き3mm幅の平面光を作り、これを円管の中心を透過させる。すなわち、光源と測定部をブラックボックスで覆うと、円管の中心をとおり、流路中に縦50mm、横幅40mm奥行き3mmの光に照射された矩形光路が形成される。この窓に垂直な方向にカメラを設置して写真を撮るのである。

定常な気泡流を形成した気液二相流循環ループの下端部、気液混合部近くの液流中に、光を反射するトレーサー粒子として、水とのスリップ速度が無

視できる、 $30\mu\text{m}$ 程度のアルミ微粒子を添加して流し、粒子からの“チンダル現象”による反射光を一定の時間シャッターを開放して写真撮影することにより、軌跡の長さから液相の局所速度が得られる。同時に、気泡の気液界面からの反射光の軌跡長さから気泡の流速が測定できる。微粒子と気泡の反射の軌跡は、軌跡の幅が異なるので容易に区別できる。また、気泡径と局所ボイド率は、自然光でテスト部を明るくしてフラッシュ撮影することにより、気泡径と数密度から決定されるか、または、局所の平均気泡径が変わらなければ、気泡の軌跡の数密度から求められる。

この方法の欠点は、ボイド率が大きくなり手前の気泡が反射光を遮るようになると測定できないことである。このため、低ボイド率の気泡流のみが可能である。また、気泡面からの反射光は強く、これに比べ微粒子からの反射光は微弱であったため、増感現像して、やっと、軌跡が撮影された。この方法は原理的には問題なく巧くいくと思われた。

同一条件で50枚程度の写真を撮り、これを引き伸ばして現像し、管径方向に40分割した幅1mmの間隙部分(ルート)に存在する、それぞれの軌跡の長さを、ノギスで測定して(読み取り顕微鏡がなく)平均化し、液相速度分布と気泡速度分布を求めらるのである。液单相流では比較的うまく乱流分布に近いものが得られ大いに期待していたのである。

当初、1流動条件の計測について、最低、写真50枚 \times 40ルート \times ルート内の軌跡数 \times 2(アルミと気泡の軌跡) \approx 10,000点程の軌跡長の測定データ数が必要である。この程度であれば、若さと粘りにかけて、結果が出せると考えていた。

しかし、いざ気泡流で測定すると、軌跡の長さがその乱流変動で予測される以上にばらつき、信用できる再現性のある速度分布を得ることが出来なかった。結果的には、数ヶ月の悪戦苦闘の結果、匙を投げてしまい、報告に値する結果を得ずに終わってしまった。

失敗の原因

代表点1条件の測定で、再現性のある信頼できるデータが得られたら、測定を続けたと思いますが、これが得られなかった主な原因は次の2つにあると考えられる。

気泡流では、気泡の螺旋運動や気泡形状の変形に伴う振動と滑り速度のため、気泡のみならず、液相の流速も、流れに垂直方向の速度が单相流に比べて大きい。このため、

- ① シャッターの開放時間の間に、微粒子や気泡が光路から外れたり、掠めたりすると、実際の移動距離より短い軌跡として撮影される。

- ② 粒子や気泡からの反射光とカメラの間に気泡が横切る場合があると気液界面での光の回折により短く撮影される。

これらの影響を小さくするには、シャッター時間を短くし、①②が生じるチャンスを少なくしてやれば良いが、これでは軌跡が短くなり、(ノギスによる計測精度が 0.1mm 程度であるので、軌跡の長さは、 20mm 程度が適当)軌跡長の計測精度が落ちる。写真をさらに大きく引き伸ばす方法があるが、経費が掛り過ぎる。他の方法として、軌跡長さのスペクトル分布を調べれば、その形状から①②による軌跡は取り除くことが出来ると思われたが、このためには各ルートあたりのアンサンブル数を最低でも更に、20倍近く飛躍的に多くしなければならない。

さらに、

- ③ この計測に用いた二相流の循環装置もこの測定をやるのに最適に制作されていなかった。

すなわち、微粒子濃度も常に一定で循環するように、ループが制作しておらず、微粒子が気液分離器や貯水タンク部で分離されてしまい、濃度が減少するので、毎回の測定毎に、微粒子を注入することになり、このため、ポンプからのバイパス流に粒子タンクを設け、注入部を設置したが、この粒子注入が意外と煩雑であったことと、粒子数濃度の均一性が欠いていた。

本測定の失敗は、大きな変動を有する二相流の計測は本質的に統計処理となるのに、その様な計測が、どのくらい大変になるかを、予め、詳しく検討せず、押し進めたところに問題があった。原理的に可能で容易とわかっていても、測定には労力、時間、経費まで考えた検討を要するのである。

終わりに

気泡流の流動機構の測定は、後に飯田先生が開発されたパルス処理手法の探針法でボイド率分布、先端の位置をずらした複針の相互相関による遅れ時間で気泡速度、さらに、水用のフィルムプローブを用いた熱線流速計を用いて液相流速分布を測定することができ、結果を伝熱シンボで報告したが、この失敗から6年も後の1969年のことであり、結局この方法では、今もって成功していない。

最近、二相流解析モデルの開発のため、レーザー流速計や超音波流速計を利用して、二相流の内部構造を非接触で測定する試みがある。また、デジタルカメラや高速ビデオの発達で写真観察し、変位計測および統計処理の自動化と高速化が出来れば、スペクトル分布から、①②の影響を受けた軌跡は取り除くことができると思われる。しかし、偽データの除去と計測精度には、細心の注意を要しよう。

溶融状態における樹脂材料の特性試験 ～ミネソタ大学より～

Property Measurement of Molten Polymer

～A Report from University of Minnesota～

世界のホットユース

斉藤 卓志 (ミネソタ大学化学工学・物質科学科)

*Takushi SAITO (Department of Chemical Engineering
and Materials Science, University of Minnesota)*

1. はじめに

このページを読まれる方の中で、アメリカ合衆国の白地図を前にミネソタ州の位置を正確に答えることが出来る方がどの程度いるのか少し気になると思いますが、今回はそのミネソタ州からの話題です。

筆者は昨年(1997年)の12月に東京工業大学生産機械工学専攻の熱システム講座において博士課程を修了し、現在はミネソタ大学のChemical Engineering and Materials Science学科(以下CEMS)にPost Doc. 研究員として籍を置いています。これは筆者が高分子材料加工プロセスの解明及び改善、あるいは製品品位の向上に対する研究を行うにあたり、機械工学からだけではなく、化学・材料工学からのアプローチをも試みることで、総合的かつ体系的な知見を得ることができるのではないかと考えたためです。

現在の研究が化学工学をベースとしていることもあり、本稿に対して必ずしも的確な話題を提供できるか多少の不安はありますが、ミネソタの雰囲気とともにMaterial Processingに対する化学工学からのアプローチの一端が伝わるようであれば幸いです。

2. ミネソタ州について

ミネソタ州はアメリカの中北部に位置し、22万平方キロメートル(日本の約60%)の面積と、約450万人(日本の3.8%)の人口を有しています。州都はセントポールですが、経済的にはミネアポリスが中心地となっています。ただ、この両都市は互いに車で15分程度の位置にあり、実際にTwin Citiesと呼ばれるほど密接な関係にあります。

ミネソタ州には3MやHoneywellに加えNorth West航空の本社があるため、日本からのアクセスは非常に便利です。しかしながら日本人の観光客はあまり見受けられず、現地の日本人の多くは州内の大学の留学生や、企業の駐在員・研究員のようなようです。

ミネソタ州内にはミシシッピ川の源流を初め多くの川が流れており、広大な森林地帯や氷河期の名残

である多くの湖(州の車のナンバープレートには10,000 Lakesと記されている)とともにすばらしい自然環境を提供してくれています。

3. ミネソタ大学について

ミネソタ大学(University of Minnesota)の創立は1876年に遡り、アメリカとしては歴史のある州立の総合大学であり、多くの分野で世界的に優れた研究業績をあげています。大学は州内にいくつかのキャンパスを持っていますが、最も大きいのはCEMSが含まれるTwin Citiesキャンパス(図1)で、全米の各州と100以上の国々から集まった約41,000人の学部学生と約8,700人の大学院生が在籍しています。

筆者の所属するCEMSには現在35人の教授がおり、応用化学・応用物理学・応用生物学の各分野で、挑戦的で重要な研究・開発を行っています。また、そのレベルはその国際的貢献度から言っても世界のトップクラスであると考えられます。学科内はいくつかの分野ごとに数人の教授でグループを作り、共同で様々なプロジェクトを進めています。筆者の指導教官であるChristopher W. Macosko教授が所属するポリマーグループには他に4人の教授がおり、グループとしては主にポリマーのマイクロ構造の解析と制御、そしてその物性に関する研究を行っています。このグループではこれらの教授陣の指導の下、

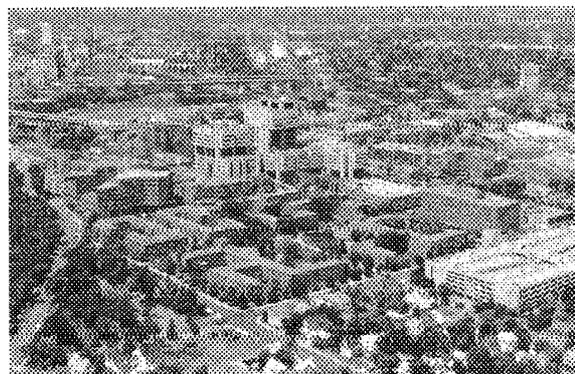


図1 ミネソタ大学Twin Citiesキャンパス

10名前後の Post Doc. 及び企業研究生, そして30名以上の大学院生が精力的な活動を行っています。

4. 樹脂材料の特性試験の重要性

実際の高分子材料の成形加工では、温度履歴のコントロールは最終的な製品品質を決定づける要因の一つとして広く認知されています。これはこのプロセスが相変化をともなう熱移動問題であるという本質を持っているため、マクロな視点における製品の形状精度から、材料の機械特性を左右するミクロなモルフォロジー形成に至るまで、材料中の熱移動が大きな影響を与えるためです。

熔融状態にあるプラスチック材料に形状を与える手法は、大別すると以下のように整理されます。

- 1) 目的の断面形状を有する流路から押し出し冷却固化させる
- 2) 目的形状の金型によりプレス, あるいはその中へ充填し冷却固化させる
- 3) ローラ等を用いて引き伸ばしたり, 窒素ガスなどで風船のように膨張させることで目的形状とし冷却固化させる

工業的に用いられている成形プロセスは非常に多岐にわたり複雑なものですが、磁気記憶媒体のベースとなるシート材や飲料水等が詰められているPETボトルは基本的に上記の3)の工程により製造されています。この時工業上、製品形状の一様性、変形限界の特定やその向上, あるいは適切な加工プロセスの設定等が求められます。これらは結局樹脂の材料特性に依存するものであるため、実プロセスにおける材料特性を明らかにすることが非常に重要となります。ところが一般に樹脂の材料特性は温度と歪み速度(本質的には時間と同義)に依存するため、その取り扱いには単純ではありません。これはポリ

マーの巨大な鎖状分子の運動やその変形に対する自由度が、温度と歪み速度の双方により決定されるためです。このため樹脂の材料特性に対する研究では温度と歪み速度の影響を独立して測定することが一般的な手法となります。この意味では、高分子材料の特性試験はかなり理想化された条件下での研究といえます。それでも実プロセスにおける樹脂挙動を推察する上で、材料の基本特性が重要な手がかりとなのは自明のことです。

熔融状態にある樹脂材料の重要な物性の一つとして粘度があります。上記に示されるような伸張(引張)状態における粘度は、せん断状態における応力と粘度の関係と同様に次式で与えられます。

$$\sigma \Big|_t = \eta \Big|_t \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

ただし σ は引張応力, η は伸張粘度, ε は歪み, t は時間。すなわち一定温度, 一定歪み速度下における引張応力を測定することでその材料の伸張粘度が求められます。この目的のために作られたのが伸張粘度測定装置ですが、その外観を図2に示します。中央の大きなステンレス製の箱は図3に示される試験部を納める加熱チャンバで、その内部は外部ポンベより導入される窒素ガスで満たされます。またこの導入ガスは電気ヒータによる熱交換で温度調整されており、その対流効果によりチャンバ内部を設定温度(最高で300℃まで加熱可能)に維持します。測定試料の寸法は長さ60mm, 幅8mm, 厚さ1.5mmです。試料が完全に熔融状態に至った後、上下左右にある4組のキャタピラーが機械的に駆動されることで、設定された歪み速度で測定対象を引張ることができます。また、中央のテーブルの上部は多孔質金属でできており、ここからも予め加熱された窒素ガスが吹き出すことで、試料温度の精度を高めると



図2 伸張粘度測定装置の外観

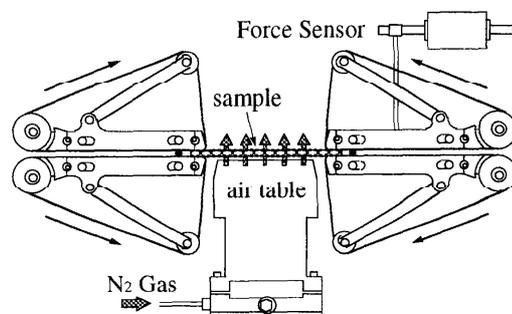
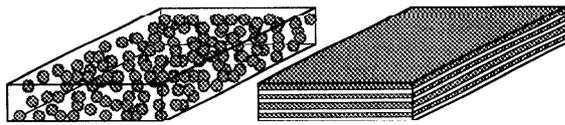


図3 測定部の詳細図

ともに、浮力を与えることでテーブル上面との接触を防ぎ、熔融状態にある試料の純粋な粘度測定を可能としています（一般に樹脂粘度は熔融状態でも1～10kPa・s以上あり、流れ出したり、ガス流れにより吹き飛ばされることはありません）。

5. Multilayer 材料の特性

実際の高分子材料の使用では、しばしば望ましい特性を得るために複数のポリマーを互いに混ぜ合わせる（ブレンド）場合があります。この時ミキサ等による混練工程により、図4 a) に示されるように一方の材料の内部に他方の微細な粒子が均一に分散する状態が得られます。一方、最近注目されるブレンド方法として図4 b) に示されるような積層構造（Multilayer）材料があります^{3,4)}。この Multilayer は図5 に示される、特殊な構造を有する流路を用いて2種類の材料を互いに積み重ねていくことで得られます⁵⁾。この時、図中のセグメント数を変更することで、積層数を2の指数として変化させることができ、試験的には5000層（この場合の各層の厚さは0.3 μm 程度）を超える材料も作られています。このような二次元方向に連続した構造を持つ Multilayer 材料では、二種類の異なる特性を有する材料を用いて強度と靱性を同時に高いレベルで実現できたり、耐薬品性や気密性を向上させるためのバリア構造、各層を光の波長オーダー程度に揃えることで光学フィルタとしての利用などが可能となります。



a) Droplet structure b) Multilayer Structure
図4 ブレンドサンプルの構造例

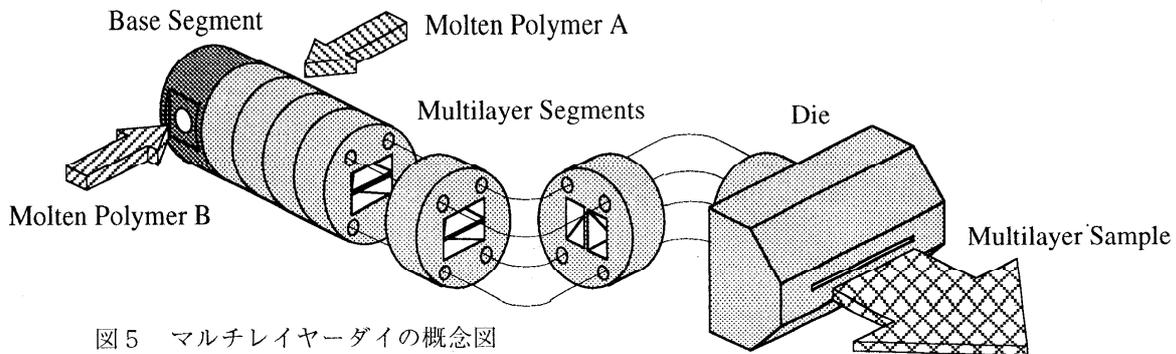


図5 マルチレイヤーダイの概念図

現在の自分の研究の一つは、先に述べた伸張粘度測定装置を用いて、このような Multilayer 材料の特性を明らかにすることですが、具体的には、

- 1) Multilayer 構造による材料強度変化の評価
- 2) 各レイヤ間に働く界面張力の測定
- 3) 各レイヤ界面における分子拡散速度の測定等を行っています。これらの結果は Multilayer 材料の製造プロセスにおける制御パラメータを決定するのに重要であり、結果として最終的な製品品質の向上に結びつくものとなります。

6. おわりに

以上、化学工学における Material Processing の一環として自分が取り組んでいる研究の一部を簡単に紹介させていただきました。

先にも述べたように、材料の特性試験では、物質本来の特徴を明らかにするために、しばしば実際のプロセスとは異なる測定条件が用いられます。ここで述べた Multilayer 材料の伸張粘度測定にしてもその例外ではないでしょう。この点が実現現象の理解と再現をふまえて研究を行う機械工学との大きな違いかもしれません。しかし、より優れたものを模索するという点において本質的な違いはなく、自分としてはこのような多面的な捉え方こそが異なる分野で研究を行うことの意義であると考えています。

参考文献

- 1) Meissner, J. and Hostettler, J., Rheologica Acta 33, 1-21 (1994)
- 2) Shanden, M. C. M., Meijer, H. E. M. and Lemstra, P. J., Polymer 34, 2148-2154 (1993)
- 3) Levitt, L. and Macosko, W., Journal of Rheology 41, 671-685 (1997)
- 4) Schrenk, W. J., Shastri, R. K. and Ayres, R. F., U.S. Patent 5, 094, 788 (1992)

The Frontiers および The Frontiers Group 形成について

Formation of "The Frontiers" and "The Frontiers Group"

フロンティアフォーラム

第36期企画部会長

西尾 茂文 (東京大学生産技術研究所)

Shigefumi NISHIO (Institute of Industrial Science,
University of Tokyo)

1. はじめに

伝熱学会発足3周年を迎えた平成8年4月号の本会誌「伝熱研究」における基盤強化委員会(林勇二郎委員長)からの提案には、基盤強化の方策の一つとしてとして“The Frontiers”の形成を日指す必要性が指摘されており、これを受けて、第34回日本伝熱シンポジウムではフロンティアフォーラムが企画され、応募された3件のテーマに関して将来の方向性などが活発に議論された。“The Frontiers”は、もとよりトップダウン的ではなく伝熱の研究に係わる研究者・技術者により自発的に形成されてこそ意味があるものであるが、伝熱シンポジウムの場において行うことなどを考えると、企画者の便を図り企画・立案を促進するための事務的事項をいくつか定めておく必要がある。

そこで、第36期企画部会では、基盤強化委員会からの提案をさらに具体化すべく、“The Frontiers”形成に関して最小限必要と思われる事務的事項を検討し、その結果を理事会に提案し、承認を得た。以下に示す方針は、その概要をまとめたものであり、会員諸氏の積極的企画・立案を期待したい。

2. 趣旨 (The Frontiers とは)

“The Frontiers”とは、主としてエネルギーとの関わりにおいて発展してきた伝熱の研究がマンネリ化あるいは成熟化してきているとの認識の下に、他領域で芽生えつつある技術における熱的問題への早期のアプローチなどを含めて「シンセシスの基盤」(技術としての問題意識の明確化)を強化しつつ、微視的記述、非平衡力学、(伝熱のみでなくプラズマや超流動などに代表される)特定温度場で発現する事象、物質移動・化学反応・電磁場などと熱的事象との連結などへと研究領域を積極的に深化・拡大させ、「アナリシスの基盤」(基礎事象としての問題意識の明確化)を強化し、伝熱の研究の基盤強化を図るための研究対象・研究手法を指す。

3. The Frontiers Forum

3.1 “The Frontiers Forum” : “The Frontiers”による基盤強化を行うためには“The Frontiers Group”が形成される必要があるが、この形成を助成・促進するために“The Frontiers Forum”を開催する。“The Frontiers Forum”は上記趣旨に基づいて自発的かつ自由に行われるものであり、以下に定める最小限の事務的事項以外は企画担当者が独自の発想で行うものとする。

3.2 “The Frontiers Forum”の開催手続き等(図1参照) :

3.2.1 “The Frontiers Forum”の準備 : (1)“The Frontiers Forum”開催の準備としてとして、“The Frontiers Forum 準備セッション”(以下準備セッションと略記)を、伝熱シンポジウム会場にて期間中に開催する。(2)準備セッションテーマの募集案内は、「伝熱研究」等に掲載される伝熱シンポジウム研究発表募集と同時に発行(募集の原稿作成は企画部会が担当する)。応募締切は、伝熱シンポジウム研究発表申込締切と同日とするが、申込先は企画部会長もしくは幹事とする。(3)応募されたテーマに関しては、趣旨に相違するもの以外は会場が許容する限り基本的には受け付ける。但し、企画部会は、独自に準備セッションを立案できるものとする。(4)準備セッションの開催案内(テーマ名および企画担当者名を含む)は、「伝熱研究」等に掲載される伝熱シンポジウムプログラム中に記載する。

3.2.2 準備セッションの運営 : (1)準備セッションでは、当該テーマ概要、“The Frontiers Forum”開催時期(すなわち第何回の伝熱シンポジウムで“The Frontiers Forum”を行うか)、開催方法(下記3.2.3項参照)などについて説明・議論する。(2)準備セッションに割り当てる時間は、1テーマ当たり30分程度とする。(3)準備セッションについては、原稿などの伝熱シンポジウム講演論文集への掲載は行わない。(4)準備セッションに対しては、通信費あるいは資料作成

代として企画者の希望により1万円を企画部会運営費より支給できることとするが、それ以外の助成は行わない。但し、会場アルバイトなど伝熱シンポジウム準備委員会が依頼する事項に関しては、企画部会が援助することができるものとする。

3.2.3 “The Frontiers Forum”の開催：(1)準備セッション企画者は、準備セッション開催直後の「伝熱研究」7月号に、準備セッションにて説明・議論した内容をまとめ、当該テーマに関する“The Frontiers Forum”開催にむけて会員が準備できるよう広報を行う。(2)準備セッション企画者は、準備セッションでアナウンスした当該回の伝熱シンポジウムにおいて“The Frontiers Forum”を開催する。(3)“The Frontiers Forum”については、1件当たり3～5時間程度を割り当てる。(4)“The Frontiers Forum”の開催方法に関しては、以下のような形態を念頭に置く。即ち、第一の形態は、発表者の事前公募や伝熱シンポジウム講演論文集への原稿の掲載などを行わず、企画者が必要最小限の話題提供者を準備する形態である。これを、便宜上“The Frontiers Forum A”と呼ぶ。第二の形態は、発表者の事前公募を募り、伝熱シンポジウム講演論文集への原稿掲載を行う形態である。これを、便宜上“The Frontiers Forum B”と呼ぶ。Aについては、例えば研究段階が極めて萌芽の段階にあり、具体的研究成果の討議というより研究の問題点・研究の進め方などの討議に重点のあるテーマが考えられる。Bについては、具体的研究がある程度は進んでおり、比較的絞られた具体的課題(宿題テーマ)に関する研究成果について討議することに重点のあるテーマが考えられる。(5)こうした開催方法については、準備セッションで企画者が指定するものとする。(6)“The Frontiers Forum A”の具体的開催案内については、「伝熱研究」等に掲載される当該年度の伝熱シンポジウムプログラム中に記載することで代える。(7)“The Frontiers Forum B”については原稿募集が必要であるため、原稿募集を伝熱シンポジウム研究発表募集と同時に「伝熱研究」等に掲載する。原稿締切および提出先などは一般発表と同一とする。但し、発表時間などは企画者が適宜割り当てるものとする。

3.2.4 当該テーマに関する“The Frontiers Forum”は数回続けて行うことを原則とする。但し、“The Frontiers Forum B”に関しては、趣旨からして開催頻度は隔年程度が望ましく、次回テーマ(宿題テーマ)などは伝熱シンポジウム開催後の「伝熱研究」に掲載しておく必要がある(原稿募集などは初年度と同様に

考える)。

3.2.5 “The Frontiers Forum”の“The Frontiers Group”への発展は、“The Frontiers”の趣旨から見て自発的に行われることが望ましい。但し、伝熱学会としての基盤強化である観点から、独自の賞を設けることや、研究経費獲得への申請補助を行うことなど、“The Frontiers Forum”の開催状況を見て、将来検討する必要がある。

4. おわりに

フロンティアフォーラムは、第34回伝熱シンポジウムにて開催されたが、これについては試行として考え、本案は第35回日本伝熱シンポジウムから適用することをご了解願いたい。

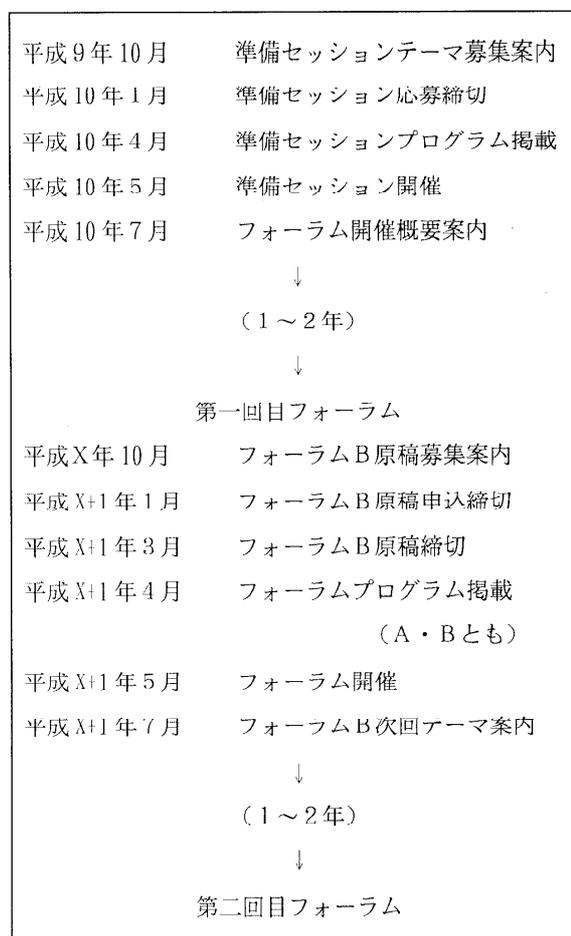


図1 “The Frontiers Forum”開催に関する手続き(この図では平成9年度を例として示してあるが、“The Frontiers Forum”のテーマ募集は毎年行うものとする)

賛助会員紹介

三菱重工業（株） 高砂研究所

Introduction of Takasago R & D Center,

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

賛助会員紹介

藤本 哲郎 (三菱重工業 (株)、高砂研究所)

Tetsuro FUJIMOTO (Takasago R & D Center,

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,)

1. はじめに

三菱重工業(株)高砂研究所は、神戸市の西約 40 km, 謡曲「高砂」で知られている兵庫県高砂市にあり、約 5 万坪の敷地に 25 の実験建屋を持つ。高砂研究所の本館外観を図 1 に示す。当所は、約 480 名のメンバーを擁し、内 430 名が研究者で、そのうち 10% が博士号を有している。

当研究所の歴史は 1908 年まで遡ることができるが、1973 年当地高砂に移り高砂研究所となって 25 年目を迎えている。当研究所はエネルギーと環境の総合研究所をめざし、原子力・火力・水力などの各種エネルギー関連機器、快適な生活環境を作る公害防止機器や冷熱装置の研究を実施している。さらに、21 世紀に向け、クリーンエネルギー技術(原子力・複合発電燃料電池等)や環境技術(脱じん, 水処理, CO₂分離・固定等), 応用物理技術(レーザ・超伝導等), 知能化技術(ロボット等), 宇宙利用技術, 電子機器技術にも取り組んでいる。技術分野としては熱, 流体, 構造, 振動, 強度等の機械工学のみならず, 電子, 物理, 化学, 材料, 制御等の広範囲な研究を行なっている。

以下にエネルギー関係を中心として, 伝熱分野の研究開発の概要といくつかの成果を紹介する。

2. 原子力分野での伝熱・流動技術

PWR の炉心内の流れは通常運転時は水単相流が流れているのが, 異常な過度変化や事故時には気液二相流が出現し, 二相流の特性把握が限界出力等の炉心の限界性能や信頼性の評価と密接に関連している。そこで, 原子力発電技術機構のプロジェクトである実機条件下での限界熱流束やボイド率を把握するための試験を実施するとともに, 水よりも低圧力・低電力で試験が可能なフレオンループも用いて, 燃料集合体の構造パラメータが熱流動現象に及ぼす影響評価やメカニズム評価のための試験を

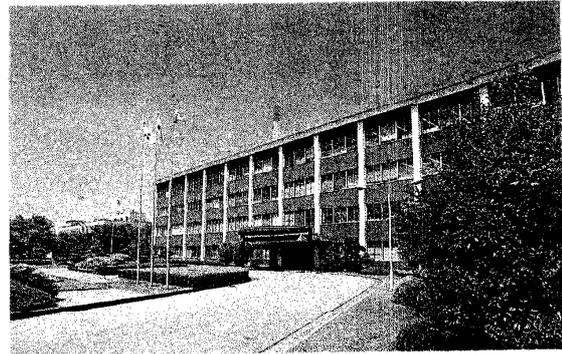


図 1 高砂研究所 (本館)

進めている。

これらの試験では, ボイド分布計測システムとして, 図 2 に示す高速 X 線 CT スキャナシステムが有効である。これは, スキャン時間が世界最短の 0.5 ミリ秒/スライスで, ボイド分布の時間変動の計測が可能であるとともに, 時々刻々の二次元断面像を積み重ねてボイドの三次元構造の検討も可能である。図 2 中に, 管内スラグ流における砲弾型の大気泡の再構成例を示している。この新しい計測手法が与える結果は, 気液二相流の現象把握やモデリングの検討に活用し解析評価技術の改良に反映している。

蒸気発生器の伝熱管外を流れる気液二相流は流動励起振動や伝熱管の腐食と密接に関連している。そのため, それを評価するための三次元気液二相流解析コードを開発し, その機能を種々のモデル試験によって検証している。現在は, 多流体モデルを用いた 3 次元解析コードを開発し改良を進めている。

また, 伝熱管と管支持板管穴との隙間での沸騰濃縮に関する研究も進めてきた。このなかで, 管穴形状を改良した BEC 型管支持板を開発し, 広く用いている。

PWR プラントでの冷却材喪失事故時の安全性研究を行い, 挙動評価のための手法を確立している。

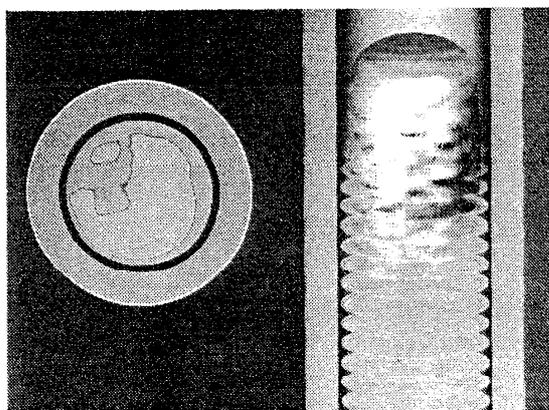
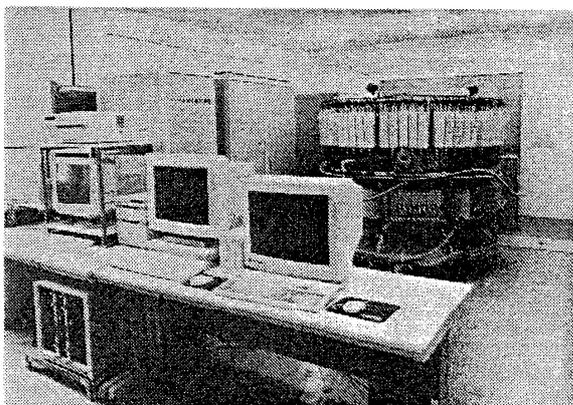


図2 高速X線CTスキャナシステム

また、開発した評価コードをシミュレータに組み込み運転員訓練用に用いている。

三菱重工業(株)はハイブリッド安全システムをもつ次世代PWRを提案している。これは、図3に示すようにパッシブ安全系として横型蒸気発生器を用いて、自然循環による炉心冷却を可能としたもの

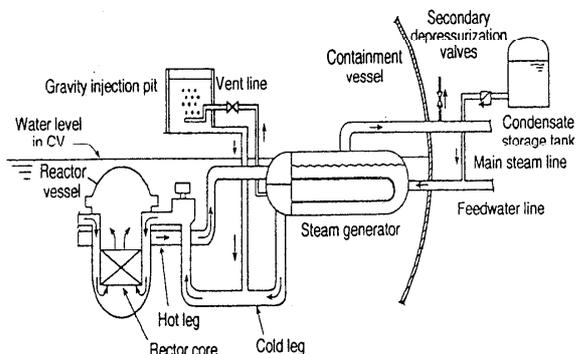


図3 ハイブリッド安全システム

である。これに関連し、横型蒸気発生器の伝熱流動試験や破断事故時の熱流動シミュレーション試験を実施している。

さらに、実機では配管口径が100mmを越えるものも多く、大口径管内の気液二相流の基礎試験も行っている。

3. ガスタービンの燃焼・伝熱技術

石油危機以来、機器の省エネルギー化、そして最近の地球環境問題に関連して、高温ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドプラントが脚光を浴びている。これらに用いられる産業用ガスタービンのタービン入口温度は1500℃のレベルに達しておりコンバインドプラントの熱効率は50%を越えている。(高位発熱量基準)この高温ガスタービンのキー技術は低NO_x燃焼器とタービン冷却技術であり、当所ではこれらに適用する広範囲な燃焼・伝熱研究を実施している。

図4は、1350℃級のマルチバーナ型予混合燃焼器であり燃焼器の壁には従来のフィルム冷却にかわって対流冷却とフィルム冷却を組み合わせた複合冷却構造MTフィンを採用している。さらに高温の1500℃級では燃焼用空気比率が増加するため壁面の冷却に使用可能な空気量は減少する。このために1500℃級の壁面冷却には、回収型蒸気冷却構造を採用している。低NO_x化に対してNO_xの生成に関係した燃焼器内部の流動燃焼現象の把握が重要で、当所では種々の実験的研究と燃焼流動解析を実施している。図5はマルチバーナ型予混合燃焼器の燃料と空気の混合の解析結果である。

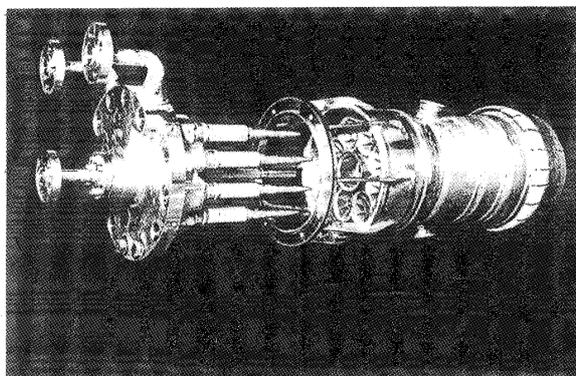


図4 マルチバーナ型予混合燃焼器

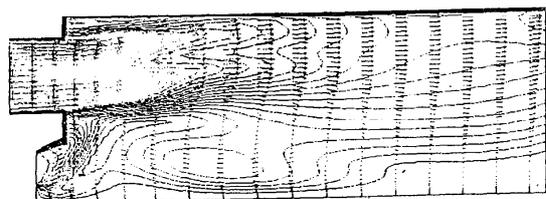
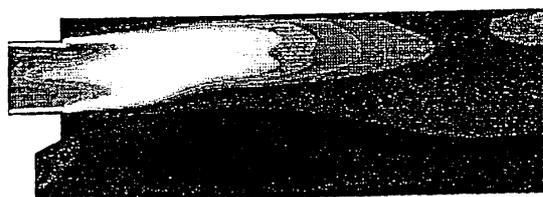


図5 予混合燃焼器の流動解析例

図6, 図7に最新の1500℃級501G型ガスタービンのタービン翼の冷却構造を示す。フィルム冷却, インピンジメント冷却, タービュレータなどの冷却手法を採用している。当所では, これら冷却手法の

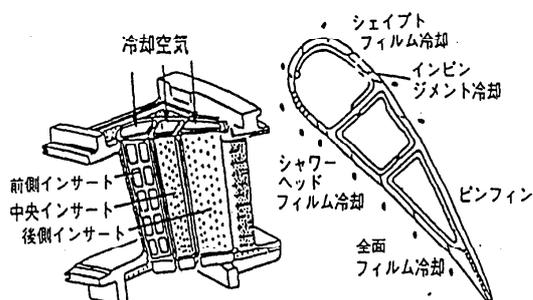


図6 Gシリーズガスタービン1段静翼冷却構造

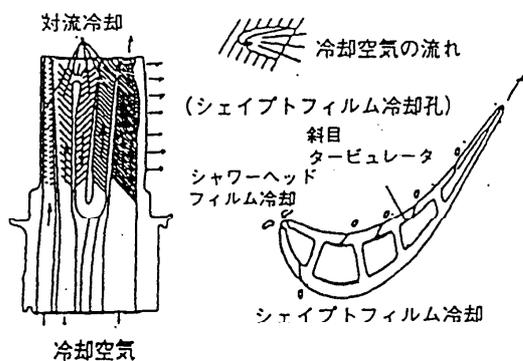


図7 Gシリーズガスタービン1段動翼冷却構造

高性能化, 内部冷却流路に関しては遠心力揚をシミュレートした流動・伝熱の実験的・解析的研究を実施している。さらにはタービン翼の非定常で複雑な三次元の流動場にフィルム冷却を実施する場合の最適化, 三次元タービン翼面の熱伝達率分布の推定など高温化に対処した高性能な冷却技術の開発を通してタービン翼の信頼性を追求している。

4. 冷凍機の伝熱・流動技術

冷凍機分野では, 大容量の吸収冷凍機やターボ冷凍機の熱交換器に関する伝熱促進や流動改善及び氷蓄熱や熱輸送の高効率化, 高密度化の課題に取り組んでいる。

吸収冷凍機では, 高効率化, コンパクト化に必要な吸収器, 蒸発器, 再生器など7種類の熱交換器の性能向上が重要課題である。特に, 大容量化した場合には管群サイズや形状が伝熱, 圧損へ影響するので, 実物断面の管群を用いた試験を行い, 精度の良い性能確認が可能となるようにすると共に, その実測データを利用して流動解析法の検証も行っている。

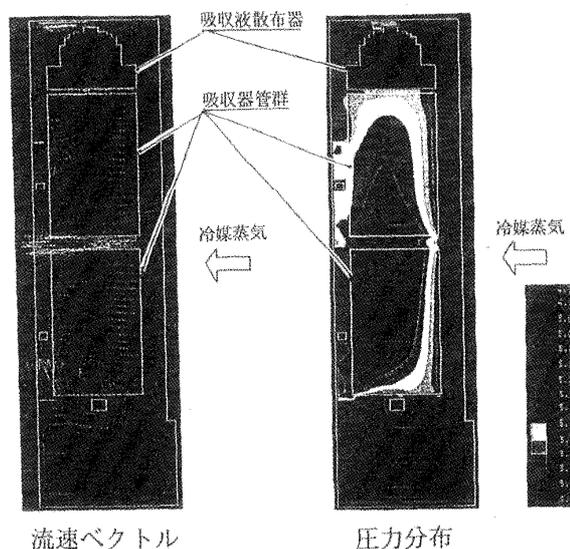


図8 吸収器冷媒蒸気流れと圧力分布

ターボ冷凍機の熱交換器では, 管群内冷媒流動分布の解析を実施し, 流れの均一化による性能向上に取り組んでいる。

夜間電力を利用した氷蓄熱システムとしては, ス

タティック型及び過冷却水を用いたダイナミック型を開発した。ダイナミック型については、ターボ冷凍機駆動の冷媒直膨型過冷却器の伝熱性能向上及び過冷却の安定性を高めるための各種要素技術を検証してきた。過冷却解除現象の理論面からの把握のため分子動力学の適用などを進め、さらなる効率向上に取り組んでいる。

氷スラリーによる熱輸送では過冷却製氷による微細な氷を使用するが、要素試験、実負荷試験を通じて、伝熱・流動特性を把握している。

また、暖房熱など温熱の輸送技術としてはPCM(相変化物質)マイクロカプセルスラリーを使用したものを考案し、このシステムのキー技術である凝固・融解潜熱を効率よく取り出すための熱交換器の開発・検証を実施した。

5. 宇宙利用分野での伝熱・流動技術

宇宙利用分野での伝熱・流動問題は宇宙空間でのエネルギーの供給、微小重力環境による特殊性等を対象に技術開発を進めている。

宇宙空間でのエネルギー供給技術としては図9に示す宇宙エネルギー基地構想を策定し、その中の主要技術である太陽熱発電システムおよび伝熱・熱輸送・放熱等の要素技術の開発に取り組んでいる。放熱技術としては、従来のパネル型ラジエータと比較して打上げ重量が大幅に削減可能な液滴型ラジエータの開発を進めている。

また、微小重力環境での伝熱・流動問題については落下塔、航空機、小型ロケット等を利用した微小

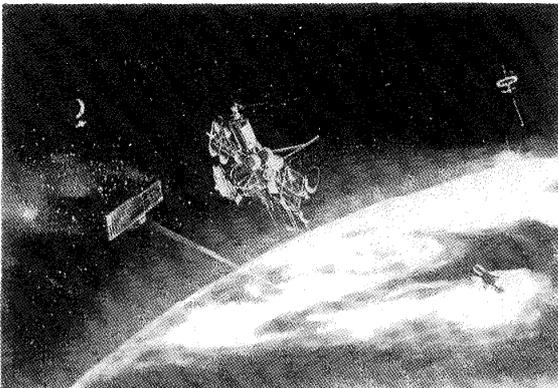


図9 宇宙エネルギー基地構想図

重力実験を実施し技術の蓄積を進めている。一例としては、向井さんが搭乗したIML-2のシャトル実験で必要性が認識された微小重力下での気泡除去技術については、従来より表面張力を利用した気液分離技術(図10)の開発を進めており、現在これらの技術の実用化をNASAと共同で推進している。

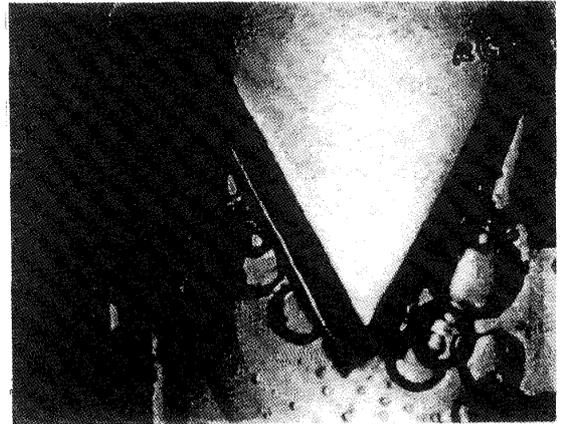


図10 微小重力下での気泡分離状況

6. まとめ

当所では、燃焼伝熱に関して、概略以上のような研究開発を行なっている。なお、三菱重工業(株)には全部で6研究所があり、技術分野別の研究会組織を設けて横の連絡を密に保つと共に、技術の維持、向上を図っている。

当所における日本伝熱学会の会員数は、12名で賛助会員の代表者は所長である柘植綾夫で連絡先は次の通りである。

郵便番号 676 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1
三菱重工業(株) 高砂研究所
電話 0794-45-6700

行事カレンダー

開催日		行事名 (開催地、開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
1997年						
10月	22(水) ~24(金)	第18回日本熱物性シンポジウム	'97.9.22		第18回日本熱物性シンポジウム実行委員会事務局 Fax.: 075-771-7286 E-mail: f54863@sakura.kudpc.kyoto-u.ac.jp	Vol. 36, No. 142
11月	5(水) ~7(金)	日本機械学会平成9年度熱工学講演会 (茨城、工業技術院筑波研究センター)	'97.6.10	'97.8.15	筑波大学構造工学系 成合英樹 Tel.: 0298-53-5256, Fax.: 0298-53-5207 E-mail: nariai@kz.tsukuba.ac.jp	Vol. 36, No. 141
	20(木) ~22(土)	第35回燃焼シンポジウム (東京、早稲田大学国際会議場)	'97.7.21	'97.9.13	第35回燃焼シンポジウム事務局 Tel.: 03-5481-3334(中山)/3268(岸本) Fax.: 03-5481-3269 E-mail: cmbmg@kokushikan.ac.jp	Vol. 36, No. 142
	30(日) ~3(水)	第10回輸送現象国際会議 (京都、京都市サテライトパーク)	Abstract '97.1.15		輸送現象国際会議事務局 鈴木健二郎 Tel.: 075-753-5250, Fax.: 075-753-5851 E-mail: ksuzuki@htrans.mech.kyoto-u.ac.jp	Vol. 36, No. 142
12月	18(木) ~20(土)	第11回数値流体力学シンポジウム (東京、中央大学理工学部春日キャンパス)	'97.9.19	'97.11.1	東京大学工学部機械工学科 松本洋一郎 Fax.: 03-3818-0835 E-mail: cfd11@iml.u-tokyo.ac.jp http://blue.iml.u-tokyo.ac.jp/CFD11	Vol. 36, No. 142
1998年						
5月	27(水) ~29(金)	第35回日本伝熱シンポジウム (名古屋、名古屋国際会議場)	'98.1.23	'98.3.13	第35回日本伝熱シンポジウム準備委員会 藤田秀臣 Tel.: 052-789-2702, Fax.: 052-789-2703 E-mail: sympo@siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp http://siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp/~sympo	Vol. 36, No. 143
6月	8(月) ~12(金)	International Symposium on Heat and Mass Transfer in Biological and Medical Engineering (Kusadasi, Turkey)	伝熱研究参照	伝熱研究参照	筑波大学構造工学系 石黒博 Tel.: 0298-53-5267, Fax.: 0298-53-5207 E-mail: ishiguro@kz.tsukuba.ac.jp	Vol. 36, No. 141
	27(土) ~29(月)	Second Trabzon International Energy and Environment Symposium (TIEES-98) (Trabzon, Turkey)	Abstract '97.11.15		東京農工大学工学部機械システム工学科 望月貞成 Tel./Fax.: 0423-88-7088 E-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp http://www.cc.tuat.ac.jp/~motizuki/tiees	Vol. 36, No. 142
8月	23(日) ~28(金)	第11回国際伝熱会議 (大韓民国、慶州)	Abstract '97.6.2	'97.10.1	九州大学工学部 藤田恭伸	Vol. 36, No. 140
12月	1(火) ~3(木)	第2回高温エネルギー変換システムおよび関連技術に関する国際シンポジウム (愛知、名古屋大学シンポジオン)			RAN98事務局 Tel.: 052-789-3913, Fax.: 052-789-3910 E-mail: narai@mhlab.nuce.nagoya-u.ac.jp	Vol. 36, No. 142
1999年						
3月	15(月) ~19(金)	第5回ASME-JSME熱工学合同会議 (米国、サンディエゴ)	Abstract '98.3.2	'98.6.15	東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 庄司正弘 Tel.: 03-3812-2111 Ext.6406, Fax.: 03-5800-6987 E-mail: shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp, a-j99@photon.t.u-tokyo.ac.jp (投稿用)	Vol. 36, No. 143

<支部活動報告>

北陸信越支部活動報告

1. 北陸信越支部設立総会

第35期第4回理事会(平成9年4月19日開催)の承認を経て、北陸信越研究グループは19年間の活動を発展的に解消し、今期より北陸信越支部として、さらに実りのある支部活動を進めることになりました。越後会長(第35期)のご臨席のもとで、記念事業として催された“座禅体験と法話”(福井市・大安禅寺)に続き、新たな気持ちで支部設立総会が開催された。設立総会の終了後、記念祝賀会が盛大に行われた。

日時 平成9年5月9日(金)16:45～17:30
会場 大安禅寺温泉 萬松閣
参加者 支部会員29名(会員外11名)

[支部第1期(第36期)役員]

支部長 前川 博(新潟大)
副支部長 竹越栄俊(富山大)、竹内正紀(福井大)
幹事 斎藤明宏(新潟工科大)、姫野修廣(信州大)、平澤良男(富山大)、松田 理(石川高専)、木村照夫(福井大)
監事 平田哲夫(信州大)、瀧本 昭(金沢大)

2. 平成9年度支部春季講演会

支部設立総会の翌日に第1回目の支部講演会が開催され、講演発表4件が行なわれた。

日時 平成9年5月10日(土)9:00～10:30
会場 大安禅寺温泉 萬松閣
参加者 39名(大学・高専28名、企業1名、学生10名)

[講演]

- (1) 下向き伝熱面による臭化リチウム水溶液への水蒸気吸収促進
姫野修廣*(信州大織), 日向 滋, 桐田勇治(信州大織院), 小林弘典(信州大織)
- (2) 生物体凍結のシミュレーション実験
多田幸生(金沢大工), 棚田順子*(金沢大院), 蔣 蓉(金沢大工), 林勇二郎
- (3) 液中内におけるドライアイスの昇華
澤田壯之*(長岡技科大院), 青木和夫(長岡技科大), 服部 賢, 有波 亮(長岡技科大院)
- (4) 鉛直平板よりの自然対流熱伝達に及ぼす形状効果

竹内正紀(福井大工), 木村照夫, 永井二郎, 林田勝也*(福井人工院)

3. 第1回複雑・複合系の相変化伝熱研究会
(支部研究会)

新しく発足した標記の支部研究会が開催され、講演2件が行なわれた。

日時 平成9年5月10日(土)11:00～12:30
会場 大安禅寺温泉 萬松閣
参加者 39名(研究会員19名, 非会員20名)
[講演]

- (1) 次世代技術と相変化伝熱
林勇二郎(金沢大工)
- (2) 冷却面における結晶水の生成と離脱現象
平田哲夫(信州大工)

講演(1)では、多成分凝固におけるミクロ偏析や生体凍結におけるミクロ構造と輸送現象としてのマクロ的取り扱いの基礎、さらには、多成分(不溶性)凝縮やミスト生成における電磁場利用など、広範囲にわたる複雑・複合系の相変化現象が解説された。

講演(2)では、リキッドアイス製氷に関する新しい方式として、液-液接触における水溶液の凍結方法が提案され、種々の液の組み合わせによる結晶水の生成および離脱について解説された。離脱現象と関連して、結晶氷発生時の熱的および力学的条件について討論がなされた。

[研究会の概要]

本研究会は、北陸信越支部を主体として設置された研究会であり、すべての相変化現象を対象とて、多成分や多層構造からなる複雑系相変化問題、種々の場(電磁場, 重力, 表面張力, 毛管圧, 浸透圧など)と複合した複合系相変化問題をミクロ的視点を踏まえて研究を行うことを目的としています。

ご関連の皆様参加を大いに歓迎いたします。お問い合わせ・その他は下記までご連絡ください。

名称: 複雑・複合系の相変化伝熱研究会
期間: 平成9年4月1日～平成11年3月31日
主査: 平田哲夫(信州大学)

(TEL 0262(26)4101)

幹事: 青木和夫(長岡技術科学大学)

(TEL 0258(47)9729)

会員: 28名

(北陸信越支部担当理事 竹内正紀)

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ

日本伝熱学会の内規に基づき、学術賞、技術賞、および奨励賞が設けられています。つきましては、下記の要領に沿って本年度の募集を行いますので、自薦、他薦を問わず応募下さいますようお願い申し上げます。

記

1. 対象となる業績

- ・学術賞の対象は、原則として、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、Thermal Science and Engineering 誌またはその他の国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文とする。
- ・技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術とする。
- ・奨励賞の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準ずるもの（大学卒業後5年以内の者）とする。
- ・学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限る。
- ・学術賞は2件程度、技術賞は1件程度、奨励賞は4件程度とする。

2. 選考方法

- ・学術賞・技術賞・奨励賞の選考は、「表彰選考委員会」が「学術賞・技術賞・奨励賞に関する覚書」によって行う。
- ・表彰選考委員は、公募の他に学術賞・技術賞・奨励賞候補を推薦することができる。

3. 提出書類

所定用紙「日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 申請・推薦書」 1通
論文抜刷または技術内容参考資料 6部
日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部

4. 提出先

〒812-81 福岡市東区箱崎6-10-1
九州大学工学部機械工学科
藤田恭伸 宛
TEL 092-642-3471 FAX 092-641-9744

5. 提出期限： 平成10年1月12日（月）必着

6. 問い合わせ先： 提出先に同じ

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞
申請・推薦書

申請・推薦者氏名 _____ 印

論文題名または： _____

技術名 _____

刊行物名または： _____

技術内容 _____

(論文抜刷または技術内容参考資料6部添付)

受賞候補者 (氏名・勤務先・職名・代表者の連絡先住所、Tel.No、Fax.No、本会会員資格
の有無、氏名には振り仮名をお付け下さい)

代表研究者 : _____

共同研究者 : _____

関連研究の伝熱シンポジウム発表

論文題名 : _____

講演発表 : 第 _____ 回シンポジウム講演論文集 _____ 頁 (抜刷6部添付)

申請・推薦理由： _____

注) 不要の文字を消して下さい。

第35回日本伝熱シンポジウム研究発表募集

- ・ 開 催 日 平成10年5月27日(水)～29日(金)
- ・ 会 場 名古屋国際会議場(名古屋市熱田区熱田西町1-1) TEL: (052) 683-7711
金山駅(JR 東海道本線・中央線, 地下鉄名城線, 名鉄)より地下鉄名城線・名古屋
港行き「日比野」または同・新瑞橋行き「西高蔵」下車徒歩5分
- ・ 研究発表申込締切 平成10年1月23日(金)必着
- ・ 論文原稿締切 平成10年3月13日(金)必着
- ・ 研究発表申込先 〒464-01 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科機械工学専攻
第35回日本伝熱シンポジウム準備委員会事務局・廣田真史
TEL: (052) 789-2702 FAX: (052) 789-2703
E-mail: sympo@siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp
ホームページ: <http://siphon.me.mech.nagoya-u.ac.jp/~sympo>

【シンポジウムの形式】

- ・ 一般申込によるセッション形式で実施し、講演時間は1題目につき20分(発表時間10分)の予定です。

【研究発表申込方法】

(1) インターネットによる申込

ホームページにある研究発表申込ページに必要な事項を記入し、お申込下さい。その後、申込確認のメールがお手元に届きましたら、それに記載されている申込番号をご記入の上、申込整理費3,000円を郵便振替(口座番号:00840-0-87825;口座名称:第35回日本伝熱シンポジウム準備委員会)でご送金下さい(本号挟込みの払込取扱票をご利用下さい)。

(2) 郵送による申込

本募集要項最終ページに印刷されている研究発表申込書(コピー可)に必要な事項を記入し、申込整理費3,000円を郵便振替(口座番号と口座名称は上記と同じ、本号挟込みの払込取扱票をご利用下さい、申込番号欄は空欄にして下さい)でご送金の上、その払込票兼受領証のコピーを添えてお申込下さい。

- ・ 研究発表申込ページにあるセッション分類表から、発表内容が属する項目[大分類A-Oと小分類・特別セッション(1)-(51)]を必ず選んで下さい。また、郵送で申込まれる方は、次ページのセッション分類表から同様に項目を選んで必ずご記入下さい。
- ・ 講演発表申込は、講演者1名につき1題目に限ります。
- ・ 発表の採否・セッションへの振分けは準備委員会にご一任願います。
- ・ 研究発表申込受理通知は、原則としてE-mailで行います。

【論文】

- ・ 講演論文集は原寸大のオフセット印刷で作製致します。論文の長さは、1題目当たりA4用紙2ページとし、1ページの文字数が2段組×片側26字×文字60行=3120字です。
- ・ 執筆要項は、伝熱研究の1998年1月号及びホームページに記載致します(発表申込者宛にはお送り致しませんのでご注意下さい。必要な場合は、80円切手同封の上お申出下さい。なお、執筆形式は前回のシンポジウムと同じです)。

【ご注意】

- ・ 研究発表申込後の取消は、準備と運営に支障を来しますのでご遠慮下さい。
- ・ 論文原稿の題目と著者名が申込書と相違しないよう、研究発表申込書のコピーをお手元にお残し下さい(プログラム編成は、申込書に記載された題目と著者名に基づいて行われ、会誌等に掲載されます)。
- ・ ご不明な点がございましたら準備委員会事務局にお問合せ下さい。

第35回日本伝熱シンポジウム準備委員会委員長
藤田 秀臣

【セッション分類表】

I. 大分類		
A 強制対流 B 自然対流 C 沸騰 D 凝縮 E 物質移動 F 融解・凝固 G 混相流 H ふく射 I 熱伝導 J 熱交換 K 熱機器 L 熱物性 M 反応・燃焼 N 分子・マイクロ O その他		
II. 小分類		
(1) 層流伝熱	(2) 乱流構造と伝熱	(3) はく離流における伝熱
(4) 噴流・せん断層の流動と伝熱	(5) 乱流のモデル化と数値シミュレーション	(6) 密閉空間内の自然対流
(7) 物体周りの自然対流	(8) 複合対流伝熱	(9) 対流熱伝達の促進・制御
(10) 回転場の流動と伝熱	(11) 多孔質体の伝熱	(12) 電子機器の冷却
(13) 生産・加工プロセスにおける流動と伝熱	(14) 限界熱流束	(15) 膜沸騰・極小熱流束
(16) 核沸騰	(17) 遷移沸騰	(18) 凝縮伝熱
(19) 沸騰・凝縮における伝熱促進	(20) 二相流のモデル化と数値解析	(21) 二相流の流動と伝熱
(22) 直接接触伝熱	(23) ミスト冷却	(24) 蒸発伝熱
(25) 沸騰凝縮利用機器	(26) ヒートパイプ・熱サイフォン	(27) 高性能コンパクト熱交換器
(28) 蓄熱蓄冷	(29) 粒子層における伝熱	(30) 熱物性値と測定法
(31) 燃焼における伝熱	(32) ふく射物性	(33) ふく射伝熱
(34) 計測技術	(35) ヒートポンプ・冷凍・空調	(36) 微小重力下の流動と伝熱
(37) 生体と食品の伝熱	(38) 自然エネルギー利用	(39) 都市・地球環境に関する熱物質伝達
(40) 融解・凝固	(41) 伝導伝熱	(42) 分子動力学
(43) 分子・マイクロスケールの伝熱	(44) 電場・磁場・電荷移動下での伝熱	(45) その他
III. 特別セッション		
(46) 「自動車における伝熱」 オーガナイザー：長野靖尚（名工大），青木博史（豊田中研） 大原敏夫（デンソー），平尾康彦（三菱重工）		
(47) 「航空宇宙における伝熱」 オーガナイザー：加藤征三（三重大），中原崇文（愛工大） 青木美昭（三菱重工），山本孝之（川崎重工）		
(48) 「セラミックスなどの先進材料における伝熱」 オーガナイザー：荒木信幸（静大），中村泰久（東邦ガス） 渡邊激雄（中部電力），森 聡明（名工研）		
(49) 「廃棄物・未利用エネルギーなどの有効利用における伝熱」 オーガナイザー：藤井照重（神戸大），畑田敏夫（日立機械研） 佐藤幹夫（電中研）		
(50) 「生産において期待される伝熱研究」		
(50-1) 「エネルギー・重電・環境機器など」 オーガナイザー：真家 孝（石播重工），福山佳孝（東芝）		
(50-2) 「エレクトロニクス・家電・半導体など」 オーガナイザー：石塚 勝（東芝），大串哲郎（三菱電機）		

第35回日本伝熱シンポジウム研究発表申込書

講演 題目	和文			
	英文			
著者名（フルネーム） （講演者に＊印）		所属・勤務先 （省略形）	伝熱学会 会員資格	会員外の方の所 属学協会と資格
和文				

英文				
和文				

英文				
和文				

英文				
和文				

英文				
セッション分類（研究発表募集中の分類表をご参照下さい。I-1, II-1, II-2 は必ずご記入下さい）				
I. 大分類（A-O）		1. ()	2. ()	3. ()
II. 小分類・特別セッション（1-50）		1. ()	2. ()	3. ()
キーワード（4つ程度）				
() ()		()		
() ()		()		
連絡先				
住所	〒			
氏名				
TEL		FAX		
E-mail				
通信欄：				
準備委員会記入欄	受付日	年	月	日
				受付番号

“The Frontiers Forum 準備セッション” 企画募集

(第 35 回日本伝熱シンポジウムにおいて開催)

- 趣旨・詳細： 「伝熱研究」本号の「The Frontiers および The Frontiers Group 形成について」参照
開催日時： 第 35 回日本伝熱シンポジウム初日（平成 10 年 5 月 27 日）夕刻を予定
開催場所： 第 35 回日本伝熱シンポジウム会場（名古屋国際会議場）
応募資格： 企画代表者（応募者）が本会会員であること以外は、特に資格は問わない。
応募締切： 平成 10 年 1 月 23 日（金）
応募要領： A 4 用紙に「The Frontiers Forum 準備セッション」と標記し、①テーマ名、②企画代表者および企画協力者数名の氏名・所属・連絡先、③テーマの概要（400 字程度）、④背景となっている研究会などがある場合はその名称と簡単な活動内容を記し、下記宛に期日までに送付する。なお、採否は 2 月 10 日までに企画代表者にお知らせいたします。
応募・連絡先： 〒106 東京都港区六本木七丁目 22-1 東京大学生産技術研究所 第二部
西尾 茂文（TEL 03-3402-6231, FAX 03-5411-0694）

第 6 回微粒化シンポジウム

《微粒化ネットワークの構築を目指して》

論文募集および参加募集のご案内

主催：日本液体微粒化学会・日本エネルギー学会 協賛：日本伝熱学会 他 33 団体

第 6 回微粒化シンポジウムが下記の通りに開催されます。

研究論文発表および参加にご希望の方は、日本液体微粒化学会事務局にお問い合わせください。

記

- (1) 日 時： 平成 9 年 12 月 20 - 21 日（土、日）
(2) 場 所： 神戸大学 工学部（〒657 神戸市灘区六甲台町 1）
(3) 講演申込： 講演申込期限 平成 9 年 10 月 11 日（土） 原稿締切 平成 9 年 11 月 17 日（月）
(4) 参加申込： 事前申込期限 平成 9 年 12 月 8 日（月）
(5) 参加費： 会員 6,000 円（事前申込 5,000 円）、非会員 9,000 円（事前申込 8,000 円）
学生 2,000 円 懇親会 5,000 円（学生は無料）
—本会会員は会員として参加できます—

連絡先

日本液体微粒化学会 事務局

〒223 横浜市港北区日吉 3-14-1

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 徳岡研究室気付

Tel. 045-563-1141 Ex. 3196 Fax. 045-563-5943

E-mail: tokuoka@mech.keio.ac.jp

No. 97-67 講習会

混相流技術の実用化 —基礎・計測から数値解析まで—

(日本機械学会流体工学部門 企画)

協賛：化学工学会，可視化情報学会，ターボ機械協会，土木学会，日本原子力学会，日本航空宇宙学会，日本混相流学会，日本伝熱学会，日本流体力学会，粉体工学会

開 催 日 1997年11月13日(木)，14日(金)

会 場 日本機械学会会議室 [東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階]

題目・講師

●11月13日(木)●

9:30-10:45 / (1) 気液混相流の基礎とモデリング 東京大学教授 大学院 松本洋一郎
10:45-12:00 / (2) 流体・固体混相流の基礎とモデリング 大阪大学助教授 工学部 田中敏嗣
12:00-13:30 市販ソフトウェアのデモ
13:30-17:10 / (3) 市販ソフトウェアの解説・事例紹介
流体コンサルタント 増淵健郎, AEAテクノロジー 蓬田寿男, CD-asdapco Japan 徐 錦青,
エス・イー・エイ 辻 和志, アイ・イー・エー・ジャパン 樋口俊章

●11月14日(金)●

9:30-10:30 / (4) 粒子流動と乱流，混相流の計測 慶応義塾大学教授 理工学部 前田昌信
10:30-11:30 / (5) 気液混相流のPIV計測技術 福井大学教授 工学部 山本富士夫
11:30-13:30 市販ソフトウェアのデモ
13:30-14:30 / (6) エアレーションの数値解析の実用例 福井大学助手 工学部 村井祐一
14:35-15:35 / (7) 固気混相流と磨耗解析の実用例 九州大学教授 大学院 清水昭比古
15:40-16:40 / (8) 回転場における気液，固液混相流解析の実用例 名古屋大学教授 情報文化学部
峯村吉泰

定 員 70名，申込先着順により定員になり次第締め切ります。

聴講料 会員・協賛会員 30000円(学生 10000円)，会員外 50000円(一般学生 15000円)，教材1冊分
代金を含みます。

教 材 教材のみご希望の方は1冊会員 4000円，会員外 5000円で頒布いたします。代金を添えてお申
し込みください。

申込み・問合わせ先 所定の申込書をお送りいたしますので次のところへお問い合わせください。

日本機械学会 流体工学部門(担当職員 村山ゆかり) 電話 03-5360-3505, FAX 03-5360-3508

第5回 ASME-JSME 熱工学合同会議論文募集

5TH ASME/JSME THERMAL ENGINEERING JOINT CONFERENCE

開催場所 米国 サンディエゴ San Diego Princess Resort on Mission Bay ホテル

開催期日 1999年3月15日(月) - 3月19日(金)

会議は口頭発表形式で、一般論文発表に加え、キーノート、パネルディスカッション、オープンフォーラム、ビデオセッション等が行われる予定です。また、論文集はCD-ROM出版となります。論文内容は熱工学に関連した基礎および応用的なトピックスとして、例えば、以下に示す内容などが含まれます。

Thermal properties; Heat conduction; Forced convection heat transfer; Turbulent heat transfer; Natural convection; Condensation; Multi-phase flow and heat transfer; Thermal problems in space technology; Heat Transfer in rotating machines; Fluidized bed heat transfer; Cooling of electronic equipment; Heat and mass transfer in porous media; Energy storage; Boiling heat transfer; Measurement and data processing; Cryogenic heat transfer; Active techniques for heat transfer augmentation; Combustion fundamentals; Combustion technologies; Heat transfer in fires; Bio-heat and mass transfer; Heat exchangers; Heat pump and refrigerations; Heat transfer and fluid flow in manufacturing and materials processing; Microscale heat transfer; Radiation heat transfer; Energy conversion systems; Thermal problems in the environment; and Heat transfer education.

募集要領 500字程度の英文アブストラクトをJSME側の委員長宛に送付下さい。アブストラクトには、論文タイトル、キーワード(数語)、著者名、所属、連絡先住所、電話、Fax、E-mailアドレスを必ず記入して下さい。(E-mailによる投稿も受け付けます)

送付先

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 庄司正弘

Tel:03-3812-2111 Ext.6406, Fax:03-5800-6987

E-mail: shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp, または a-j99@photon.t.u-tokyo.ac.jp (投稿用)

アブストラクト締切 1998年3月 2日(月)

アブストラクト採否通知 1998年4月 1日(水)

論文原稿締切 1998年6月15日(月)

この会議に関する最新の情報は日本機械学会熱工学部門のホームページに掲載する予定です。

<http://ted.mech.titech.ac.jp/TED/tcdj.html>

内容問い合わせ先

〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

慶應義塾人学理工学部システムデザイン工学科 菱田公一

Tel 045-563-1141 Ext.3130, Fax 045-562-7625,

E-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

日本伝熱学会北海道支部 特別講演会のお知らせ

協賛 断熱材研究会

米国商務省(DOC)国立研究所、NIST (National Institute of Standards and Technology、旧称 NBS) の Director である Hratch G. Semerjian 氏が来日します。センサー技術、流れ・温度・圧力の計測、自動車排ガスの測定と基準、流体物性など、工学全般にかかわる内容について、講演して頂く予定でおります。米国の最先端技術の動向を聞く、よい機会かと思われます。沢山の皆さんの参加をお待ちしております。

日 時：平成9年10月13日(月) 16:00~17:30
場 所：北海道大学工学部機械会議室
講 師：NIST Director, Hratch G. Semerjian
講演題目："Measurements and Standards Research at NIST"
概 要：

National Institute of Standards and Technology (NIST) is a non-regulatory federal agency within the U.S. Department of Commerce. Its primary mission is to promote economic growth by working with industry to develop and apply technology, measurements, and standards. NIST carries out its mission through a portfolio of four programs: a) Measurements and Standards Program; b) Advanced Technology Program; c) Manufacturing Extension Partnership Program; and d) National Quality Program. A brief overview of these programs will be presented. New measurement methods and standards that affect manufacturing, semiconductor processing, materials and chemical processing will be discussed, with emphasis on sensor technology; flow, temperature, and pressure measurements; measurements and standards for automotive emissions; properties of industrially important fluids; and evaluated data and computational tools.

(上記特別講演に関する問い合わせ先)
北海道大学大学院 都市環境工学専攻
空間形態学分野 早坂 洋史 (電話・FAX 011-706-6784)
E-Mail: hhaya@eng.hokudai.ac.jp

日本伝熱学会北海道支部・断熱材研究会合同講演会

「新技術と伝熱」というテーマで、下記の講演会を企画しましたので奮って、ご参加下さい。また、断熱材研究会との合同講演会です。断熱材の特性などに興味や疑問をお持ちの方々の参加も、お待ちしております。

日 時：平成9年10月31日(金) 15:00~17:30
場 所：北海道大学工学部第二会議室(本館1階南出口付近)
講 演：

1. 『環境、エネルギー分野での最近の産業界の伝熱研究の動向とその応用』
石川島播磨重工業 小熊正人
2. 『マイクロカプセル化相変化物質の熱輸送システムへの適用』
北海道工業技術研究所 武内 洋
3. 『可変断熱特性を有する断熱材について』
北海道工業大学 河合洋明
北海道大学大学院 早坂洋史

(懇親会)

日 時：平成9年10月31日(金) 18:00~
場 所：第二会議室(本館1階南出口付近)
参加費：2千円程度

以上の案内は、北海道研究グループのホームページ (<http://fire.arch.hokudai.ac.jp/htsj-do.html>) の行事予定の欄にも掲示しております。

(上記講演に関する問い合わせ先)
北海道大学大学院 都市環境工学専攻
空間形態学分野 早坂 洋史 (電話・FAX 011-706-6784)
E-Mail: hhaya@eng.hokudai.ac.jp

「分子伝熱検討会」発足のご案内

井上 剛良 (東工大), 丸山 茂夫 (東大), 小原 拓 (東北大)

近年の半導体関連技術, 新材料生成プロセス技術, 環境関連技術, 宇宙開発関連技術, 生体関連技術の発展などによって, 熱流体分野での分子レベルの理解が不可欠となる場合が急増しています. これに伴い, 伝熱の分野でのフロンティアとして分子動力学法を始めとする手法を用いた研究が急速に発展してきました. しかしながら, 対象とする空間・時間スケールが極端に異なるなど, 従来の伝熱研究と趣を異にする部分があるために, その応用は必ずしも容易ではありません.

分子レベル伝熱を考える上での最も重要な問題は, あらかじめ現象の基本的なスケールを見極める点であり, これを誤ると意味のない解析を進めることになってしまいます. そのための方法論の確立や分子動力学法などの手法をさらに発展させる必要があるとともに, マクロスケール現象との有機的接続の問題, 量子効果が強い場合の対処, 実験的検証の必要性等の難問に対しても検討する必要があります.

このような認識に基づき, 本年の伝熱シンポジウムのフロンティアフォーラムでの検討をさらに押し進めるべく, 分子伝熱関連の研究を行っているあるいは今後検討している研究者間での情報交換の場として「分子伝熱検討会」を設けたいと思います. この検討会は, 伝熱学会を主体とするもののこれにとらわれず, 参加・退会は自由とし, 年に数回の国内での検討会や米国との合同の学会なども進めていこうと考えていますが, とりあえず第1回の検討会を本年12月12日に下記において開催し, その場でお集まりの方々と運営方針も含めて検討しようと考えています.

なお, 参加ご希望の方は下記の申込用紙を参考にして, できるだけ電子メールで幹事の丸山までご連絡お願い申し上げます. ご質問やアドバイスなどもお待ち申し上げます.

記

第1回分子伝熱検討会

日 時: 平成9年12月12日(金) 午前10時から午後5時

場 所: 富国生命ビル15階(南側) 原研第一会議室

千代田区内幸町2-2-2

(連絡先: 功刀 資彰 TEL:029-282-5351)

会 費: 不要

分子伝熱検討会参加希望票

丸山 茂夫 行

東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

TEL: 03-3812-2111 内6421, FAX: 03-5800-6983

E-MAIL: maruyama@photon.t.u-tokyo.ac.jp

分子伝熱検討会に参加希望します.

第1回検討会に 出席 欠席

御氏名:

ご所属:

御住所:

TEL, FAX:

E-Mail:

分子伝熱関連の主な研究テーマ:

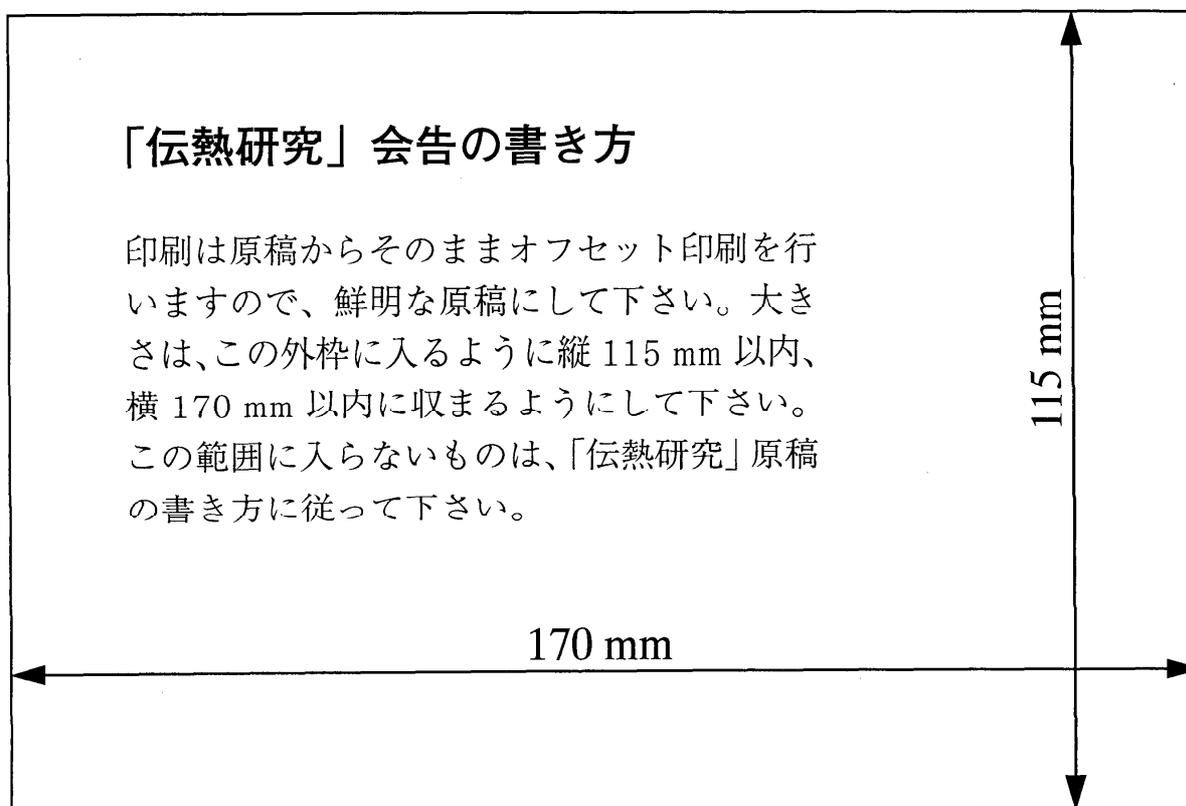
ご意見など:

東京都立科学技術大学 教官公募

1. 募集人員 専任教員（助手） 1名
2. 所 属 機械システム工学科
3. 専門分野 熱流体工学ないし伝熱工学（いずれも可）
4. 応募資格 (1) 博士の学位を有する方（着任時までに取得見込みを含む）
(2) 30歳以下の方（1998年4月1日現在）
(3) 専門分野で研究業績があると共に、学生の教育に熱意のある方
(4) コンピュータ実習、基礎的機械工作実習の教育を担当できる方
5. 着任時期 1998年4月1日
6. 提出書類 ①履歴書（写真貼付）、②研究業績リスト、③職務調書、
④論文の別刷（コピー可）、⑤現在の研究概要と今後の研究計画
（各A4版1枚程度）
* 上記①②③は本学所定の用紙があるのでご請求ください。
7. 応募締切 1997年11月28日（必着）
8. 書類提出および問合せ先 〒191 東京都日野市旭が丘6-6
東京都立科学技術大学機械システム工学科 田代伸一
電話(0425)83-5111 内3304、FAX (0425)83-5119
9. 応募書類請求先 〒191 東京都日野市旭が丘6-6
東京都立科学技術大学庶務課庶務係
電話(0425)83-5111 内2113
10. その他 (1) 提出書類は簡易書留による郵送とし、封筒に「教員応募書類在中」と朱書してください。
(2) 応募書類は返却しませんのでご了承願います。
(3) 必要に応じて面談をお願いすることがあります。

「伝熱研究」会告の書き方

印刷は原稿からそのままオフセット印刷を行いますので、鮮明な原稿にして下さい。大きさは、この外枠に入るように縦115mm以内、横170mm以内に収まるようにして下さい。この範囲に入らないものは、「伝熱研究」原稿の書き方に従って下さい。



「伝熱研究」原稿の書き方

伝熱 太郎 (伝熱大学)

(1行)
(2行)
(3行)
(4行)
(5行)
(6行)
(7行)
(8行)

42 mm

1. 「伝熱研究」用原稿の標準形式

用紙サイズ：A4 縦長 (210mm×297mm), 横書き
余白サイズ：上余白 30 mm, 下余白 30 mm
左余白 20 mm, 右余白 20 mm
コ ラ ム：2 段組とします。
1 コラム長 80 mm, コラム間隔 10 mm
活字サイズ：10 ポイント (10×0.3514=3.514 mm) の
全角文字を標準とします。英文字・
数字には半角文字が好ましい。
1 行の字数：1 段あたり 23 文字程度
行 送 り：15 ポイント (15×0.3514=5.271 mm)
1 頁あたり 45 行となります。

15 ポイント行間
15 ポイント行間

題目の部分は、編集委員会で作成いたしますので、8行の空白 (=42 mm) を用意しておいてください。また、表題・氏名・所属の和文および英文は別紙にご用意下さい。なお、2 頁目以降は、最初の行から 2 段組で本文をお書きください。

2. 「伝熱研究」用原稿作成上の注意

- (1) 印刷は原稿からそのままオフセット印刷で行いますので、この点を考慮の上、写真・図表等には特に注意して鮮明なものをご使用ください。
- (2) 原稿枚数は原則として最大10枚 (図表込み) を越えないでください。
- (3) 原稿は出力フォーマットに従って作成の上編集委員会までご送付ください。
- (4) 図表は、原稿内に直接張り込んでください。
- (5) 原稿の頁数は各頁の上すみに青鉛筆で薄く1/8, 2/8のように記入してください。
- (6) 本手引きの各種寸法及び文字数等は、お手持ちのワープロの機能によっては、必ずしもこれらを満足できないかもしれません。このような場合には適宜これにできるだけ近くなるように、原稿をおつくりくださいますようお願い申し上げます。
- (7) 本文の体裁・項目の分け方などは、自由にお書きください。

22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入
22.5 ポイント行間あるいは半行を挿入

その他の事項

・可能ならば、字体に関しては、本文には明朝体を使用し、見出しにはゴシック体を使用してください。

20

20

30

事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

【会員の種別と会費】

会員種別	資格	会費(年額)
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	8,000円 但し、 70才以上は0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

- 「伝熱研究, THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。
(本年度発行予定：4月号, 7月号, 10月号, 1月号)
・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
・賛助会員に口数分の冊数送付
- 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料で差しあげます。
・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

(注意)

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明(署名・捺印)が必要です。

2. 会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします。

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金事務処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

【変更届について】

(勤務先、住所、通信先等の変更)

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くことになります。

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の 경우에는、必要に応じて代表者を変更できます。

(学生会員から正会員への変更)

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

(変更届提出上の注意)

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届(郵便振替用紙に記載可)を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消します。

【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、至急納入をお願いします。特に、平成8年度以降の会費未納の方には「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局

(業務内容)

- 入会届、変更届、退会届の受付
- 会費納入の受付、会費徴収等
- 会員、非会員からの問い合わせに対する応対、連絡等
- 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送
- その他必要な業務

(所在地)

〒113 東京都文京区湯島2-16-16

社団法人日本伝熱学会

TEL.FAX: 03-5689-3401

(土日、祝祭日を除く、午前10時～午後5時)

(注意)

- 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス等の書面にてお願いします。
- 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5

横浜国立大学 大学院 工学研究科

人工環境システム学専攻 飯田 嘉宏

TEL:045-339-4010 FAX:045-339-4010 (又は4012)

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

(右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書
2. 変更届 (書面による届出のみ受け付け)
(注意) ・楷書体で明瞭に記入
・氏名にふりがなを付す
・通信文は余白に記入
・申込み時に郵便振替にて会費納入

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
1	会員資格	正・学					
2	氏名						
3	ふりがな						
4	生年月日	1	9	年	月	日	
5	名称						
6	* 勤務先						
7	所在地						
8	TEL						
9	FAX						
10	〒						
11	住所						
12	TEL						
13	FAX						
14	〒						
15	住所						
16	通信先**	勤務先・自宅					
17	学位						
18	最終出身校						
19	卒業年次	T・S・H					
20	専門分野						
21	学生会員の場合	指導教官名*** 印					

専門分野
 1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 混相流
 7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層
 13: 蓄熱 14: 冷凍・空調 15: 内燃機関 16: ガスタービン 17: 蒸気機関 18: 原子力
 19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ()
 例: 電子機器の冷却, 生体伝熱, 分子動力学等
 *) 学生会員入会申込者は学校名, 学部, 学年, 研究室名, 学年 (M2, D3 など) を記す。
 **) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。
 ***) 学生会員入会申込者は, 指導教官の署名・捺印を受ける。

日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届用紙

*ご記入に際しての注意
 日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので, 代表者の所属に変更
 がありましたら, 書面にて事務局宛ご連絡下さるようお願いいたします。

0	申込年月日	1	9	9	年	月	日
1	会員資格	賛助会員					
2	代表者氏名						
3	ふりがな						
4	名称 (所属)						
5	代表者						
6	* 勤務先						
7	所在地						
8	TEL						
9	FAX						
10	〒						
11	住所						
12	TEL						
13	FAX						
14	〒						
15	住所						
16	通信先**	勤務先・自宅					
17	学位						
18	最終出身校						
19	卒業年次	T・S・H					
20	専門分野						
21	学生会員の場合	指導教官名*** 印					

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです。
2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で, 申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により, 次のように分けております。
 A (3口), B (2口), C (1口)
 [日本伝熱シンポジウム講演論文集] 等をお申し込み口数1口につき1部無料ですしあげます。
3. 会員になりますと「伝熱研究」をお申し込み口数1口につき1部お送りします。この伝熱研究は通常, 年4回 (4, 7, 10, 1月号) 発行しております。但し, 日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては, 前年度の会費を年度末までに完納された会員に限り当該年度のものも無料でさしあげます。尚, 年度途中でご入会の方には残部の都合でお送りできない場合がありますので, あらかじめ承知おき下さい。
4. 本学会では, 事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてております。簡単な書式の領収書はご用意できますが, それ以外の場合には貴社指定の書式をご送付下さいませようお願いいたします。
 申込書送付先: 〒113 東京都文京区湯島 2-16-16
 社団法人日本伝熱学会事務局 TEL., FAX. 03-5689-3401

会費の払込先:

- (1) 郵便振替の場合 郵便振替口座 00160-4-14749 社団法人日本伝熱学会
- (2) 銀行振込の場合 第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941 社団法人日本伝熱学会
- (3) 現金書留の場合 上記の事務局宛に御送金下さい。

複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部
〒107 東京都港区赤坂 9-6-42-704
Phone 03-3475-4621/5618
Fax 03-3403-1738

Notice about Photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27, Congress St.
Salem, MA 01970
Phone (508)744-3350
Fax (508)741-2318

伝熱研究

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol. 36, No.143

1997年10月発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

ISSN 0918-9963

Vol. 5, No. 4

October, 1997

発行所 社団法人 日本伝熱学会

〒113 東京都文京区湯島 2-16-16

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,
Tokyo-113, Japan
Phone, Fax: +81-3-5689-3401

伝熱研究 VOL.36, NO.143

〈随想〉

改革の時代	瀧本昭 (金沢大学工学部)1
専門用語「伝熱」と「熱伝達」について	藤江邦男 (新明和工業 (株))3

〈特集：宇宙環境における伝熱〉

特集「宇宙環境における伝熱」にあたって	第36期編集委員会 小宮山正治 (大阪大学)8
臨界点近傍での伝熱現象	東久雄 (航空宇宙技術研究所)9
微小重力下の気液二相流	藤井照重 (神戸大学工学部機械工学科)16
表面張力対流の挙動	今石宣之 (九州大学)23
宇宙エネルギーシステムにおける液滴冷却器	羽賀一男 ((財) 原子力発電技術機構)31
月面ミッションのエネルギー供給と熱制御	板垣春昭 (宇宙開発事業団, 技術研究本部)37

〈研究ノートから：伝熱問題に関する未成功研究〉

「研究ノートから：一伝熱問題に関する未成功研究一」の編集にあたって	第36期編集委員会 小澤由行 (高砂熱学工業 (株), 総合研究所)45
サーモプレッサーの夢と失敗	一色尚次 (日本大学)49
単一液粒の蒸発実験	小林清志 (豊田工業大学)52
一氷状凝縮の温度履歴	武山斌郎 (石巻専修大学)54
「研究を評価すること」	平田賢 (芝浦工業大学システム工学部)56
家庭冷房機用熱交換器の原価低減	藤江邦男 (新明和工業 (株))58
「未成功」は「成功」の素	棚澤一郎 (東京農工大学)60
「伝熱研究における失敗談」 -- 原理は易し, 結果を得るは難し --	井上晃 (東京工業大学)64

〈世界のホットユース〉

溶融状態における樹脂材料の特性試験 ~ ミネソタ大学より ~	斉藤卓志 (ミネソタ大学化学工学・物質科学科)66
--------------------------------------	---------------------------------

〈フロンティアフォーラム〉

The Frontiers および The Frontiers Group 形成について	第36期企画部会長 西尾茂文 (東京大学生産技術研究所)69
--	--------------------------------------

〈賛助会員紹介〉

三菱重工業 (株) 高砂研究所	藤本哲郎 (三菱重工業 (株) 高砂研究所)71
-----------------------	--------------------------------

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol.5, No.4

1. A Numerical Study of Combined Natural Convection-Conduction in an Open-Top Cavity with a Discrete Constant Heat Flux Source	1
Behnia, M. and Dehghan, A. A.	
2. New Wine in New Bottles; Unexpected Findings in Heat Transfer	11
Part IV. Unexpected Aspects of Behavior for a Double-Spiral Heat Exchanger	
Churchill, S. W.	
3. New Wine in New Bottles; Unexpected Findings in Heat Transfer	29
Part V. The Applicability of Potential Flow in Predicting Heat and Mass Transfer	
Churchill, S. W.	
4. Blow-off Limit of Lifted Diffusion Flame (in Japanese)	47
Maki, H. and Umeki, Y.	